

Phosphor: Eine kritische und zugleich unzureichend genutzte Ressource der Abwasser- und Abfallwirtschaft – Stand des Wissens und Ausblick für Österreich und Europa

Lukas Egle · Arabel Amann · Helmut Rechberger · Matthias Zessner

Online publiziert: 4. März 2016

© Die Autor(en) 2016. Dieser Artikel ist auf Springerlink.com mit Open Access verfügbar.

Zusammenfassung Die Nutzung von Phosphor (P) erfolgt derzeit in Österreich im Wesentlichen linear, Kreisläufe sind – mit Ausnahme des internen landwirtschaftlichen Kreislaufes der Nutzung von Wirtschaftsdünger (Gülle, Stallmist) – kaum ausgebildet. Gleichzeitig ist Österreich vollständig auf den Import des endlichen Rohstoffes Rohphosphat aus teils geopolitisch instabilen Regionen angewiesen. Demgegenüber weisen kommunales Abwasser und Tiermehle ein beträchtliches P-Potenzial auf, welches jedoch kaum genutzt wird. In Hinblick auf die Kritikalität von P wurden zahlreiche Technologien zur gezielten Rückgewinnung von P aus dem Abwasser entwickelt, welche vom rein technischen Gesichtspunkt bereits einsatzfähig sind bzw. teilweise bereits großtechnisch umgesetzt wurden (v. a. Rückgewinnung aus der flüssigen Phase). Mit dem Ziel einer größtmöglichen Nutzung des abwasserbürtigen Phosphors wäre zukünftig eine Rückgewinnung aus reinen Klärschlamm- oder kombinierten Tiermehl- und Klärschlammaschen anzustreben. Die dafür notwendigen Strukturen wie Verbrennungsanlagen für Klärschlamm alleine oder in Kombination mit Tiermehl müssten dazu allerdings noch ausgebaut werden. Neben neu entwickelten Verfahren können Recyclate von Rückgewinnungsverfahren (z. B. Struvit) oder reine Klärschlamm-/Tiermehlaschen

als Sekundärrohstoffe in bestehenden industriellen Prozessen wie etwa der Düngemittel- oder Phosphorsäureindustrie eingesetzt werden. Die Nachbarländer Deutschland und Schweiz streben die Rückgewinnung von P aus Klärschlämmen bzw. deren Aschen bereits über rechtlich verbindliche Ziele an. Damit dies auch in Österreich umgesetzt werden kann, sind in einem ersten Schritt das (politische) Bekenntnis und in weiterer Folge Änderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen (z. B. im Düngemittelrecht) sowie verbindliche Vorgaben erforderlich. Instrumente zur Umsetzung eines P-Recyclings können beispielsweise festgelegte Recyclingquoten für die Düngemittelindustrie (z. B. „Pxx“ in Anlehnung an die E10-Bioethanolquote) oder die Einhebung eines „Phosphorcents“ zusätzlich zu den Gebühren der Abwasserreinigung oder Abfallwirtschaft, welcher für den Aufbau der erforderlichen Strukturen (z. B. Verbrennungsanlagen für Klärschlamm und Tiermehl) herangezogen werden kann.

Schlüsselwörter Stoffkreislauf · Phosphorrückgewinnung · Abwasser · Klärschlamm(asche) · Tiermehl(asche) · Rechtliche Grundlagen

Phosphorus: a critical yet underused resource for sewage and waste management – available knowledge and outlook for Austria and Europe

Abstract Currently, the phosphorus (P) used in Austria is essentially of a linear structure. Cyclical ring structures—with the exception of those in manure (slurry, dung) used for local agricultural purposes—are as yet rudimentary. Simultaneously, Austria is entirely dependent on imports of the raw material rock phosphate, partly from geopolitically unstable regions. In contrast, sewage and

animal meat and bone meal as significant sources of P are largely ignored. In view of the importance of P, numerous technologies for targeted P recycling from sewage have been developed—some already operational from a purely technical perspective and others already implemented on an industrial scale (particularly, recycling from the liquid phase). In order to make the best possible use of sewage-borne P, recycling from pure sewage sludge or animal meat and bone meal ash combined with sewage sludge ash would be desirable in future. Necessary structures, such as incinerators for sewage sludge alone or in combination with animal meat and bone meal, however, have yet to be developed. In addition to newly developed methods, recycles (materials that are recyclable) from recycling processes (e.g., struvite), pure sewage sludge ash or animal meat and bone meal ash can be used as secondary raw materials in existing industrial processes, for instance, in the fertilizer or phosphoric acid industries. Neighboring countries Germany and Switzerland already recycle P from sewage sludge and sewage sludge ash to legally binding targets. Implementation in Austria too would initially require (political) commitment and, consequently, changes in the legal framework (e.g., fertilizer legislation) as well as binding standards. Implementation instruments for P recycling could be, for instance: defined recycling quotas for the fertilizer industry (e.g., “Pxx”, according to the E10 bioethanol quota); or levying “phosphorus cents” additional to the sewage treatment and waste management fees, to be used to develop the necessary structures (e.g., incinerators for sewage sludge and animal meal).

Keywords Materials cycle · Phosphorus recycling · Sewage · Sewage sludge (ash) · Animal meat and bone meal (ash) · Legal bases

Univ.-Ass. DI L. Egle (✉) ·
DI A. Amann · Univ.-Prof. DI
Dr. H. Rechberger · ao.Univ.-Prof. DI
Dr. M. Zessner
Institut für Wassergüte,
Ressourcenmanagement und
Abfallwirtschaft, Technische Universität
Wien,
Karlsplatz 13,
1040 Wien, Österreich
E-Mail: l.egle@iwag.tuwien.ac.at

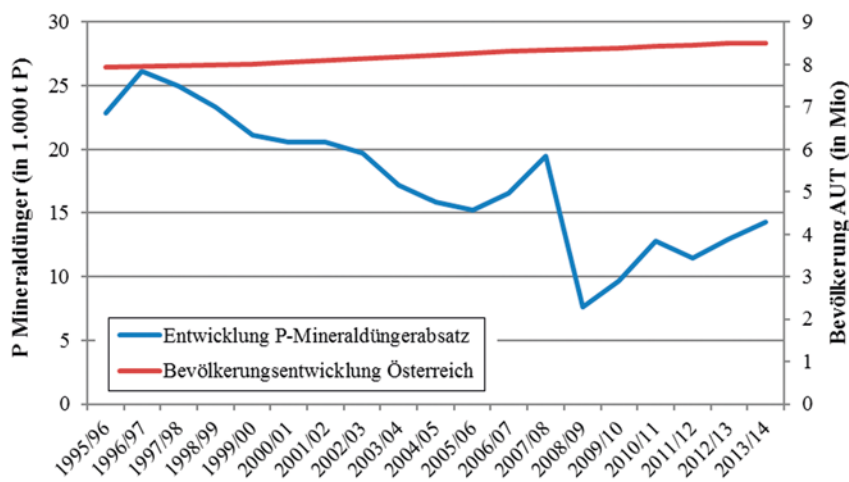


Abb. 1 Entwicklung des P-Mineraldüngerabsatzes und Entwicklung der Bevölkerung in Österreich (Grüner Bericht 2015; Statistik Austria 2015)

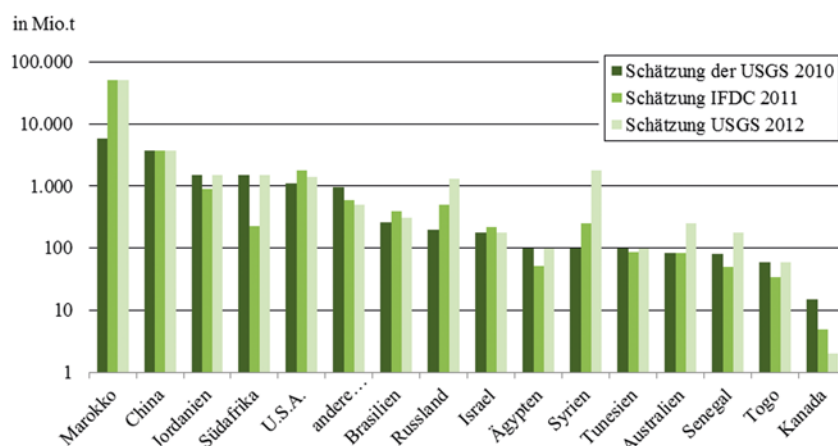


Abb. 2 Verteilung der wirtschaftlich abbaubaren P-Lagerstätten (USGS 2010, 2012; IFDC 2011)

1. Einleitung

Phosphor (P) ist ein essenzieller und nicht substituierbarer Nährstoff für alle Lebewesen und ein Schlüsselement in zahlreichen physiologischen und biochemischen Prozessen. Zur Nahrungsmittelproduktion wird der erforderliche P in Form organischer Düngemittel (z. B. Gülle, menschliche Ausscheidungen) und mit Fortschritt der Industrialisierung der Landwirtschaft in immer höherem Ausmaß durch schnell verfügbare mineralische Düngemittel auf Rohphosphatbasis auf die landwirtschaftlichen Böden aufgebracht. Rohphosphate werden aus sedimentären oder magmatischen Lagerstätten gewonnen, wobei die europäischen Staaten, mit Ausnahme kleinerer Lagerstätten in Finnland, keine abbauwürdigen P-Quellen besitzen. Infolgedessen ist Europa, und damit auch Österreich, zu nahezu 100 %

von Importen abhängig. Angesichts der dominanten Rolle phosphorhaltiger Mineraldünger am globalen Gesamtphosphorangebot (80–90 % des abgebauten Erzes wird für die Düngemittelproduktion eingesetzt) ist es offensichtlich, dass die zukünftige P-Nachfrage vor allem durch die Entwicklungen im Bereich der Landwirtschaft geprägt sein wird. Diese Entwicklungen wiederum werden einerseits durch das prognostizierte Bevölkerungswachstum und andererseits durch Veränderungen der Ernährungsgewohnheiten infolge der stetigen Verbesserung des Lebensstandards in Schwellenländern und Entwicklungsländern getrieben. Während in den letzten Jahren in diesen Ländern der Düngemittelabsatz zugenommen hat, kann in Österreich, wie in fast allen westlichen Ländern, in den letzten 10 bis 20 Jahren eine Abnahme des P-Absatzes durch gesteigerte P-Versorgung der Böden und

Optimierung der P-Düngung festgestellt werden (Abb. 1). Der massive Einbruch im Jahr 2008 ist auf die unverhältnismäßig hohen Preisanstiege (+400 %), unter anderem aufgrund von Spekulationen infolge der Wirtschaftskrise und (Straf-) Zölle in China, zurückzuführen (Weltbank 2015).

Zahlreiche Studien verwiesen Anfang der 2010er-Jahre auf einen möglichen P-Peak im Jahr 2035, ähnlich dem Öl-Peak (Cordell et al. 2009). Auf Grundlage der damals bekannten wirtschaftlich abbaubaren Lagerstätten errechnete sich eine statische Lebensdauer von 60–70 Jahren (statische Lebensdauer: wirtschaftlich abbaubare Lagerstätten dividiert durch den aktuellen jährlichen Abbau). Die steigenden Preise für Rohphosphate resultierten jedoch in der Exploration neuer Lagerstätten, aufgrund derer die aktuelle statische Lebensdauer derzeit bei ca. 300 Jahren liegt. Wird jedoch eine dynamische Lebensdauer unter Berücksichtigung eines steigenden jährlichen Abbaus gerechnet, kann diese auch unter 100 Jahren liegen. Während daher Aussagen über die zukünftige Verfügbarkeit aufgrund der Exploration neuer Lagerstätten und eines sich verändernden P-Bedarfes extrem unsicher sind, existieren jedoch zahlreiche andere Herausforderungen, die in Hinblick auf die Kritikalität von Phosphor als Ressource betrachtet werden müssen.

1.1. Ungleiche Verteilung der Lagerstätten und geopolitische Instabilität

Die derzeit bekannten, wirtschaftlich abbaubaren P-Reserven befinden sich in einigen wenigen Ländern, wobei fünf Staaten (Marokko, China, Jordanien, Südafrika und die USA) über mehr als 95 % der Reserven verfügen. Marokko mit den größten Lagerstätten besitzt über 80 % der Vorkommen (Abb. 2). Ein Großteil der weltweiten Rohphosphate stammt aus geopolitisch instabilen Regionen und einige dieser Länder schützen ihre Reserven aus strategischen Gründen.

1.2. Abnahme der Lagerstättenqualität

Phosphatlagerstätten, in erster Linie sedimentäre Lagerstätten, sind aufgrund ihrer Genese mit unerwünschten Begleitelementen vermischt (Dittrich und Klose 2008; Kratz et al. 2016). Unter anderem sind in Rohphosphaten Cadmium (Cd) und Thallium (Tl) sowie die radioaktiven Substanzen Uran (U) und Thorium (Th) mit teils hohen Konzentrationen feststell-

Tab. 1 Schwermetallgehalt verschiedener P-Lagerstätten und Klärschlamm-aschen in Deutschland und Österreich [ppm] (Dittrich und Klose 2008; Krüger und Adam 2014; Egle et al. 2015; Kratz et al. 2016)

Element	USA sedimentär		China sedimentär		Marokko/Mittlerer Osten sedimentär		Russland magmatisch		Klärschlamm- aschen (Median)	
	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	Von	Bis	AT (n=3)	GER (n=26)
As	7	24	9	26	2,1	35	1	10	13,5	14
B	600–900						350	450	80	–
Cd	6,1	92	2	2,5	1,5	38	0,1	1,3	2,5	3
Cr	60	637	18	33	25	279	13	–	92	160
Cu	9,6	23	–	–	1	31	15	30	1.370	790
Hg	0,05	0,29	0,005	0,21	0,002	0,86	0,04	0,01	0,1	0,5
Ni	17	37	–	–	20	80	2	15	93	75
Pb	4,6	17	1,5	6	1	33	1,8	33	199	117
Sr	600–1.400						–	–	–	500
V	80–100						–	–	50	54
Zn	204	382	–	–	29	630	19	23	3.270	2.500
U	65	180	23	31	40	170	10	28	–	5
Th	3–250						–	–	–	–
Tl	0,5–1,2						–	–	<1	4,9

bar. Während Erze aus magmatischen Lagerstätten wie in Russland und Südafrika als eher „sauber“ gelten, schwanken die Gehalte an unerwünschten Schwermetallen in anderen Lagerstätten deutlich (Tab. 1). Typische Gehalte an radioaktiven Substanzen liegen beispielhaft bei Phosphoriten im Bereich von 20–300 mg U/kg Erz (MW: 100 mg) bzw. 3–30 mg Th/kg Erz (MW: 10 mg) und bei Apatiten im Bereich von 3–100 mg U/kg Erz (MW: 10 mg) bzw. 15–250 mg Th/kg Erz (MW: 100 mg) (BMU 2007; Elsner 2008). Gegenwärtig werden vor allem Lagerstätten mit geringer Schwermetallbelastung abgebaut. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass jedoch bereits heute eine zunehmende Belastung der Rohphosphate mit unerwünschten Begleitelementen festgestellt werden kann (Pfundtner 2015). Im Vergleich zu sedimentären Rohphosphaten liegen die Gehalte an radioaktiven Substanzen (U) und bestimmten Schwermetallen wie z. B. As, B, Cr, Cd, Sr und V in Klärschlamm-aschen teils deutlich niedriger. Gleichzeitig weisen Klärschlamm-aschen im Vergleich zu Rohphosphaten höhere Konzentrationen bei anderen Schwermetallen wie z. B. Cu, Ni, Pb, Zn auf (Krüger und Adam 2014; Egle et al. 2015).

1.3. Umweltzerstörung beim P Abbau (Tagebau) und Aufbereitung (z. B. Phosphorsäure)

Beim Abbau von Rohphosphaten werden weitreichende Naturflächen beansprucht

und zerstört. Zusätzlich fallen bei der Herstellung pro Tonne Phosphorsäure rund 5 t Phosphogips als Abfallprodukt an. Dieses Nebenprodukt wird zumeist ohne Behandlung auf Lagerhalden abgelagert (Abb. 3). Diese Halden befinden sich in Küstenregionen, nahe der P-Säure-Fabriken und verursachen dort ernsthafte Umweltschäden (Atmosphäre, Wasser, Boden) (Tayibi et al. 2009; Greenpeace 2013).

Als Alternative zu den Rohphosphaten zeigen die nationalen P-Bilanzen ein beträchtliches P-Potenzial in bekannten Abfällen wie Klärschlamm, Tiermehl oder biogenen Abfällen (Egle et al. 2014a). Durch deren Nutzung können Importe und damit Abhängigkeiten reduziert sowie nationale Wertschöpfungsketten aufgebaut werden.

2. Potenzielle anthropogene, nationale P-Quellen

2.1. Erhebung des P-Potenzials auf Grundlage der österreichischen P-Bilanz

Für die Darstellung der Möglichkeiten und Grenzen der P-Rückgewinnung in Österreich sowie die Erfassung der Relevanz möglicher Rückgewinnungskonzepte wurde für Österreich für die Jahre 2004–2008 eine detaillierte Stoffflussanalyse für P erstellt (Egle et al. 2014a). Im Untersuchungszeitraum lag der jährliche P-Mineraldüngereinsatz bei rund 2 kg pro Einwohner und Jahr

(kg/E*a). Die aktuellsten Daten des Wirtschaftsjahres 2013/2014 ergeben eine jährliche Mineraldüngeraufbringung von 1,5 kg P/E (Grüner Bericht 2015). Der Bedarf an Rohphosphaten zur Mineraldüngerherstellung muss vollständig über Importe abgedeckt werden. Über Futter- und Nahrungsmittelimporte gelangt noch einmal 1 kg P/E*a nach Österreich, dem Exporte von rund 0,55 kg P/E*a gegenüberstehen. Für jene Abwässer, die in kommunalen Kläranlagen behandelt werden, liegt das P-Potenzial bei rund 1 kg P/E*a. In Abhängigkeit von der Reinigungsleistung fällt daher mit dem Klärschlamm jährlich eine P-Fracht von 0,8–0,9 kg P/E an. Neben dem Klärschlamm (Kapitel 2.2.) sind vor allem die tierischen Abfälle und dabei die Tiermehle (bis zu 0,65 kg P/E*a) (Kapitel 2.3.) als potenzielle P-Quellen zu nennen (Egle et al. 2014). Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang das Lagerwachstum im Sektor Abfallwirtschaft (Deponien und Klinker: ~1,1 kg P/E*a), welches den Lagerzuwachs im Boden übersteigt. Dies ist vor allem auf die thermische Behandlung von großen Teilen des Klärschlammes und der Tiermehle und die darauffolgende Ablagerung der Aschen/Schlacken auf Deponien oder den Einbau des Phosphors in den Zement (Co-Verbrennung in der Zementindustrie) zurückzuführen. Durch ein gezieltes P-Management könnten also eine beträchtliche P-Fracht recycelt und Nährstoffkreisläufe implementiert werden. Abb. 4 zeigt die österreichische Phosphorbilanz. Auf Grundlage dieser Bilanz wurden bereits umfassende weitergehende Untersuchungen (z. B. Zeitreihenanalyse der P-Bilanz von 1990 bis 2014 und Optimierungspotenziale in Österreich (Zoboli et al. 2015) angestellt. Zudem kann die P-Bilanz als Monitoring-instrument herangezogen werden, um zu zeigen, inwieweit sich Maßnahmen, wie z. B. eine gezielte P-Rückgewinnung, oder Maßnahmen zur Verminderung von Erosion in der Landwirtschaft positiv auf den österreichischen P-Haushalt auswirken.

2.2. Phosphorpotenzial in Abwasser bzw. Klärschlamm und Klärschlamm-aschen

Zur Einhaltung der strikten Phosphorgrenzwerte laut Abwasseremissionsverordnung ist in Österreich der Einsatz von Eisen- bzw. Aluminiumfällmitteln üblich. Für Rückgewinnungsverfahren aus der wässrigen Phase (siehe Kapitel 3.1.) und



Abb. 3 Obertägige Lagerung des bei der Produktion von Phosphorsäure anfallenden Phosphorgips in China (Greenpeace 2013)

einzelne Verfahren zur Rückgewinnung von P aus dem Klärschlamm ist allerdings eine biologische P-Elimination die Voraussetzung, weswegen der Einsatz dieser Rückgewinnungsverfahren in Österreich ohne Umstellung auf Bio-P zur P-Elimination stark eingeschränkt ist. In Österreich sorgen derzeit rund 1.840 Kläranlagen für eine gesicherte Reinigung der anfallenden kommunalen Abwässer. Die dabei jährlich entstehende Klärschlammmenge kann mit rund 260.000 t TS beziffert werden, wobei rund ein Viertel auf der Hauptkläranlage in Wien anfällt. Bemerkenswert ist, dass in den 30 Kläranlagen mit einer Belastung > 100.000 EW rund 55 % des anfallenden Abwassers behandelt werden. Werden auch die Kläranlagen > 10.000 EW berücksichtigt, fällt dort auf 261 Kläranlagen sogar 90 % des abwasserbürtigen P an. Die Anzahl der Kläranlagen > 10.000 EW entspricht dabei rund 15 % der insgesamt 1.840 Kläranlagen Österreichs (Abb. 5). Somit sind es speziell die größeren Kläranlagen, die für eine P-Rückgewinnung von Bedeutung sind, da hier bei einer überschaubaren Anzahl von Einzelanlagen auf den Großteil des P-Potenzials zugegriffen werden könnte.

Obwohl die direkte landwirtschaftliche KS-Verwertung die kostengünstigste Variante des P-Recyclings ist, werden gegenwärtig nur rund 16 % des österreichischen Klärschlammes direkt in der Landwirtschaft ausgebracht (BAWP 2014). Die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung ist in Österreich nicht einheitlich geregelt und fällt in die Kompetenz der Bundesländer. Beispielsweise gilt in Wien und Tirol ein grundsätzliches Verbot der direkten landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung. Die Diskussion über die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung wird sehr kontrovers geführt. Diese Art der Nährstoffnutzung hat in den letzten Jahren jedenfalls an Bedeutung verloren. Mit ein Grund dafür dürfte sein, dass Klärschlämme

ein Konzentrat der Abwasserreinigung sind und neben Schwermetallen eine Kontamination mit organischen Spurenstoffen aufweisen, deren Risiken nicht abschließend bewertet werden können. Das Ausmaß der indirekten Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft in Form von Komposten oder Biogasgülle kann nur mit hohen Unsicherheiten angegeben werden und liegt in der Größenordnung von rund 10 % des kommunalen Klärschlamm-aufkommens. Das bedeutet, dass rund 25 % des im Klärschlamm vorhandenen Phosphors derzeit im Sinne einer Kreislaufführung auf die landwirtschaftlichen Felder aufgebracht werden. Rund 50 % werden thermisch verwertet, wovon bereits mehr als die Hälfte in den Wirbelschichtöfen 1 bis 3 der Fernwärme Wien verbrannt wird. Gegenwärtig werden jedoch weitere flüssige und feste Brennstoffe mitverbrannt, wodurch das P-Potenzial von rund 0,15 kg P/E* a oder 1000–1200 t P/a aus diesen Aschen infolge der Verdünnung mit und Kontamination durch die Brennstoffaschen als verloren betrachtet werden muss. Auch durch die Behandlung von Klärschlamm in Müllverbrennungsanlagen, der Zement- und Kohleindustrie, aber auch bei Aufbringung im Landschaftsbau auf Flächen ohne entsprechenden Bedarf muss der P des Klärschlammes im Sinne einer Nutzung als verloren betrachtet werden.

2.3. Phosphorpotenzial in Tiermehlen österreichischer Tierkörperverwerter

Tierkörperverwertungsanlagen (TKV) verarbeiten tierische Nebenprodukte wie ganze Tierkörper, Tierkörperteile oder Erzeugnisse tierischen Ursprungs, die nicht für den menschlichen Verzehr bestimmt sind, zu Tier- und Knochenmehlen sowie Tierfett. Während Tierfett keinen P enthält, liegt der P-Gehalt von Tiermehlen bezogen auf die Trockensubstanz im Bereich von 3,0–6,6 % (Garcia

und Rosentrater 2008). Die Metall- und Schwermetallgehalte sind im Vergleich zum Klärschlamm sehr niedrig. Hervorzuheben ist der hohe Heizwert von rund 20 MJ/kg Trockensubstanz, der jenem guter Braunkohle entspricht. Die anfallenden tierischen Rohmaterialien werden in Österreich an nur vier Standorten konzentriert behandelt: Burgenländische Tierkörperverwertung GmbH & Co KG (Unterfrauenhaid), Tierkörperverwertung Oberösterreich GmbH (Regau), Steirische Tierkörperverwertung GmbH (Ehrenhausen) und Saria Bio-Industries GmbH (Tulln). Das Tiermehlaufkommen in Österreich liegt konstant im Bereich von 85.000–88.000 t/a.

Auf Basis der Angaben der Tierkörperverwerter sowie Literaturdaten kann für Tiermehl eine mittlere P-Konzentration von 4,6 % angenommen werden. Durch Multiplikation der mittleren P-Konzentration mit der jährlich anfallenden Tiermehlmenge (88.000 t) kann für das in Österreich anfallende Tiermehl von einer jährlichen P-Fracht von rund 4.000 t ausgegangen werden.

Tiermehle werden nach EU-Verordnung (EG 2009) anhand der davon ausgehenden Risiken (z. B. BSE) in drei Kategorien eingeteilt. Kategorie 1 (Tiermehle mit höchstem Risiko) muss thermisch behandelt werden. Im Vergleich dazu darf beispielsweise Kategorie 3 als Dünger auf Felder aufgebracht werden. Im Jahr 2011 wurde Tiermehl zu etwa je einem Drittel thermisch behandelt, direkt als Düngemittel (direktes P-Recycling) eingesetzt oder exportiert (Abb. 6). Der Einsatz als Düngemittel ist auf die Gehalte an P und Stickstoff (N) zurückzuführen, womit Tiermehl als organischer NP-Dünger bezeichnet wird. Ein Großteil (ca. 45 %) des thermisch behandelten Tiermehls entfällt auf die Mitverbrennung in der Zementindustrie (Mauschitz 2013). Eine weitere detaillierte Aufgliederung in Kohlekraftwerke bzw. Abfallverbrennung ist aus Datenschutzgründen derzeit nicht möglich. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Anteil der Kraftwerke an der thermischen Tiermehlbehandlung von geringer Bedeutung ist (Scholz 2014). Exportiertes Tiermehl wird zu 55 % thermisch behandelt oder über die Düngemittel- und Tierfutterindustrie wieder der Landwirtschaft zugeführt (45 %) (BAWP 2011). Der Vergleich der Zahlen von 2011 mit denen des aktuellen Statusberichts des Abfallwirtschaftsplans macht deutlich, dass sich

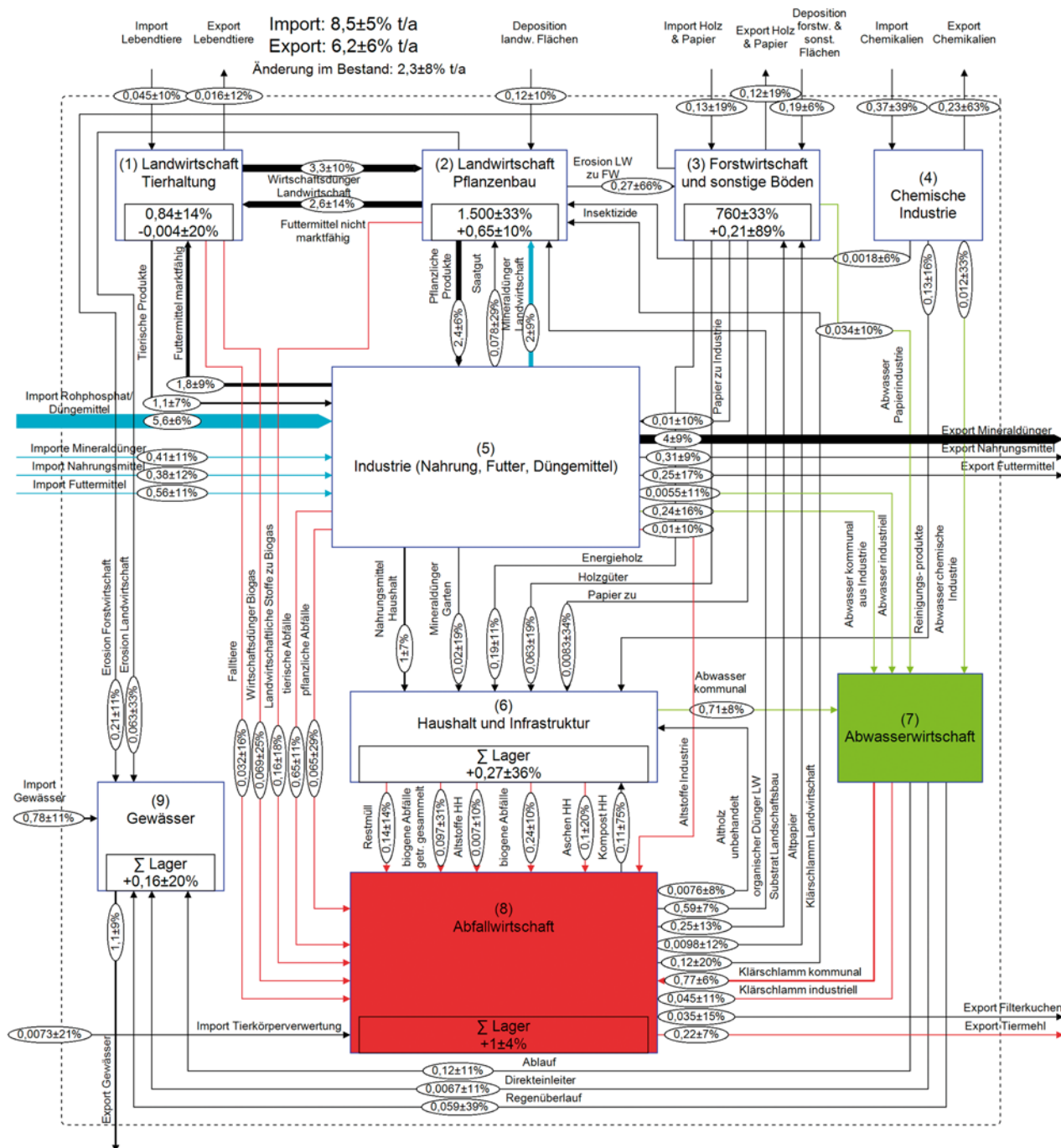


Abb. 4 Die österreichische P-Bilanz (blau: Importe an Rohphosphaten/Düngemitteln, Nahrungs- und Futtermitteln, rot: Input an Abfallflüssen in den Prozess Abfallwirtschaft, grün: Inputflüsse in den Prozess Abwasserwirtschaft)

die Behandlungs- und Verwertungspfade sehr dynamisch verändern.

Aus den Daten des Bundesabfallwirtschaftsplans und Informationen der Tierkörperverwertungsanlagen kann abgeleitet werden, dass in Österreich pro Jahr bis zu 33.000 t Tiermehl der Kate-

gorie 1 (höchstes Risiko) anfallen und folglich thermisch behandelt werden müssen (Inland: 16.400 t/a, Ausland: 17.400 t/a). Da dieses Tiermehl zurzeit in der Zementindustrie oder in Kohlekraftwerken mitverbrannt wird, müssen die enthaltenen 1.500 t P/a als verloren

betrachtet werden. Zur Nutzung dieses P-Potenzials muss Tiermehl entweder monoverbrannt oder alternativ als heizwertreicher Zusatzbrennstoff bei der Klärschlammverbrennung eingesetzt werden. Durch die Verwendung der Tiermehle als Düngemittel werden Nähr-

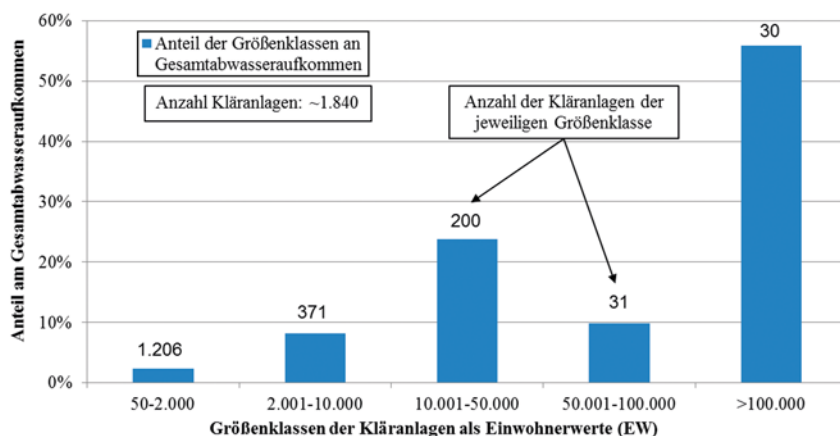


Abb. 5 Aufgliederung des Gesamtabwasseraufkommens in Relation zu den Größenklassen der Kläranlagen in Österreich (EmRegV-OW 2009)

stoffkreisläufe direkt geschlossen. In Österreich werden aktuell bereits rund 30 % des Tiermehls (Kategorie 3) in der Landwirtschaft eingesetzt (ca. 1.100 t P/a). Anzumerken ist, dass über 50 % des in Österreich anfallenden Tiermehls – und damit eine beträchtliche P-Fracht von bis zu 2.000 t P/a – ins Ausland exportiert werden.

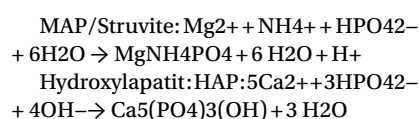
3. Überblick über Technologien zur Rückgewinnung von P aus dem Abwasser

Aufgrund des komplexen Stoffstroms Abwasser und der verschiedenen Stoffströme auf einer Kläranlage existieren zahlreiche unterschiedliche Ansätze, P aus dem Abwasser rückzugewinnen (Abb. 7). P kann bereits vor der Einleitung in ein Kanalnetz aus dem Urin (separate Sammlung (1)), auf einer Kläranlage aus der wässrigen Phase (2+3.1+3.2) und Schlammphase (4.1 + 4.2 + 4.3) oder im Anschluss an eine Verbrennung (5) aus den P-haltigen Aschen rückgewonnen werden. In diesem Beitrag werden die Verfahren nur knapp beschrieben. Detaillierte Informationen und Ergebnisse der ganzheitlichen technischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung sind Egle et al. (2014c) zu entnehmen.

3.1. Urin und wässrige Phase auf Kläranlagen

Der gelöst vorliegende P (PO_4^{3-}) im Urin und Schlammwasser kann mit geringem verfahrenstechnischen Aufwand rückgewonnen werden. Werden durch Zugabe von geeigneten Mg- oder Ca-haltigen Fällmitteln und Anhebung des pH-Werte (pH-Bereich 7,8–9) durch Zugabe

von Natronlauge oder CO_2 -Strippung die optimalen Prozessbedingungen in einem eigenen Reaktor geschaffen, fallen schwer lösliche Salze gezielt aus (MAP/Struvit bzw. Calciumphosphate). Teilweise werden diese Reaktoren mit Aufwuchsmaterial wie z. B. Sand oder bereits ausgefällten Struvitkristallen gefüllt, um eine Kristallisation zu initiieren. Durch eine Aufenthaltszeit der ausgefällten MAP-Kristalle von mehreren Tagen können Pellets in der Größenordnung von 1–4 mm gezüchtet werden (Abb. 8). Alternativ kann im Schlammwasser durch Zugabe von CSH (Calcium-Silikat-Hydrat)-Partikeln eine Auskristallisierung des gelösten Phosphors initiiert werden (P-RoC, Ehbrecht et al. 2011).



Unter bestimmten Bedingungen (z. B. Druckänderung, pH-Wert-Verschiebungen) kann der gelöste P des Schlammwassers unkontrolliert ausfallen und zu unerwünschten Ablagerungen (Inkrustationen) in verschiedenen Anlagenteilen einer Kläranlage wie z. B. Rohrleitungen oder Pumpen führen. Ein Positivkriterium dieses Verfahren ist daher, dass bei gezielter P-Fällung Vorteile für den Kläranlagenbetrieb entstehen und durch den Verkauf des anfallenden Endprodukts teilweise ein kostendeckender Betrieb möglich ist. Bekannte Verfahren zur Rückgewinnung des gelösten P aus dem Schlammwasser sind:

- DHV Crystallator (Giesen 2002),
- Nishihara Reactor (Nawamura et al. 2001),
- NuReSys® (NuReSys 2015),

- Phospaq® (Abma et al. 2010),
- Ostara PearlReactor® with Crystal Green® (Britton 2009),
- Phosnix Unitaka (Ueno and Fujii 2003),
- Phostrip (Kaschka and Weyrer 1999),
- REPHOS® (Lebek and Lohmar 2013) und
- STRUVIA™ (Mélé et al. 2014).

Unter geeigneten Rahmenbedingungen kann die Fällung des gelösten P als MAP auch direkt im Faulschlamm erfolgen (AirPrex®, Ewert 2009), was neben der Verhinderung von Ablagerungen zusätzlich die Entwässerbarkeit des eher schlecht zu entwässernden BioP-Schlammes fördert, wodurch diese Verfahren aufgrund dieser Verbesserung auch wirtschaftliche Vorteile bringen können. Ein Teil der im Schlamm gebildeten MAP-Kristalle (Abb. 8) kann durch einfache Sedimentation am Reaktorboden entnommen werden. Das dabei gewonnene MAP kann als positiver Nebeneffekt betrachtet werden.

Die erzeugten P-reichen Endprodukte weisen eine hohe Reinheit im Hinblick auf Schwermetalle, organische Spurenstoffe und hygienisch relevante Keimbelastung auf. Bei der Bewertung der Schwermetalle und organischen Spurenstoffe im Vergleich zu bekannten Handelsdüngern schneiden diese Produkte teils deutlich besser ab. Die Düngeeigenschaft, insbesondere von MAP, ist trotz fehlender Wasserlöslichkeit mit einem handelsüblichen und wasserlöslichen Mineraldünger vergleichbar. Das Rückgewinnungspotenzial bezogen auf den Kläranlagenzulauf ist stark von der Rücklösung des vormals biologisch gebundenen P während der anaeroben Schlammbehandlung abhängig und liegt im Bereich von 10–30 %. Hohe Rücklöseraten werden nur bei Kläranlagen mit biologischer P-Entfernung erreicht, aufgrund der geringen Anzahl solcher Kläranlagen in Österreich ist das nationale Rückgewinnungspotenzial daher limitiert. Durch Produkterlöse und Einsparungen im Kläranlagenbetrieb (z. B. Vermeidung von Ablagerungen, Reduktion der Nährstoffrückbelastung, verbesserte Entwässerbarkeit des Schlammes) werden die Verfahrenskosten gedeckt bzw. sogar übertroffen. Damit ist ein wirtschaftlicher Betrieb dieser Rückgewinnungstechnologien aus dem Schlammwasser möglich. Zahlreiche großtechnische Umsetzungen weltweit bestätigen dies.

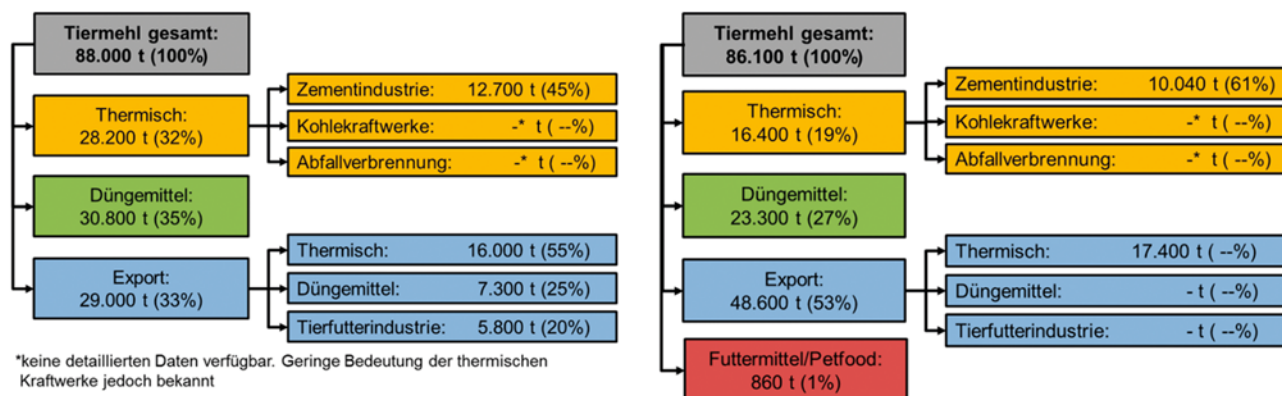


Abb. 6 Behandlung- und Verwertungspfade von Tiermehl (links: Stand 2011, BAWP 2011; rechts: Stand 2014, BAWP 2014)

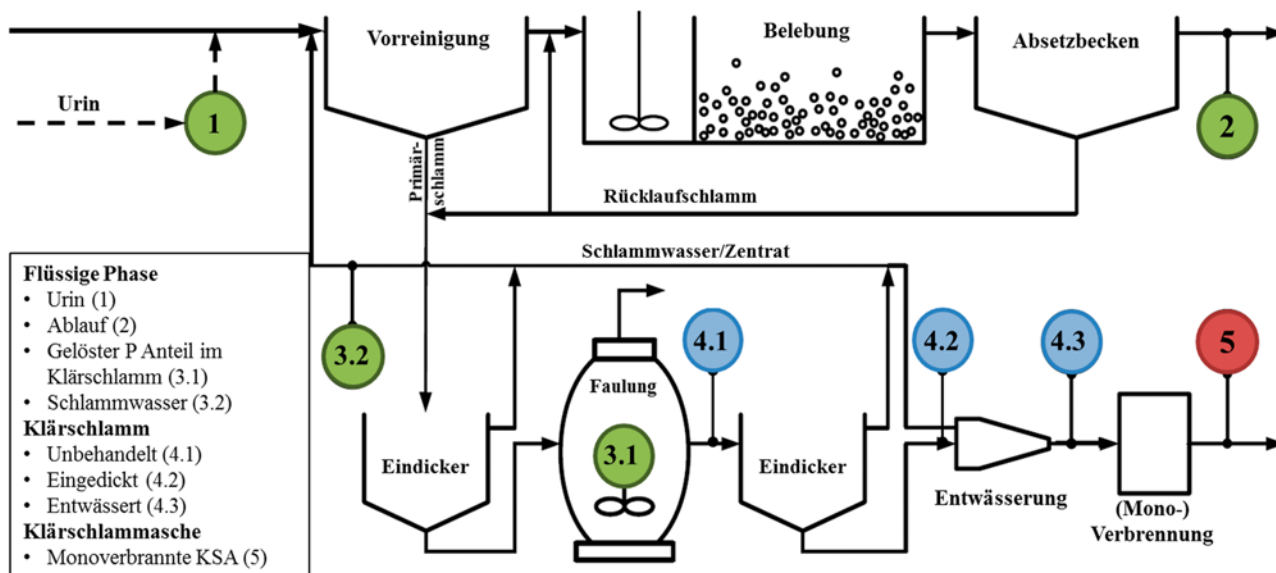


Abb. 7 Potenzielle Stoffflüsse zur Rückgewinnung von P vor dem Zulauf zu einer Kläranlage, in der Kläranlage und nach thermischer Behandlung (Monoverbrennung) des Klärschlamms durch Verbrennung (Montag 2008, modifiziert)

3.2. Klär-/Faulschlamm

Über den Klärschlamm können theoretisch bis zu 90 % des abwasserbürtigen P rückgewonnen werden. Im Vergleich zum Schlammwasser handelt es sich beim Klärschlamm um ein komplexes Gemisch aus organischen und anorganischen Stoffen mit unterschiedlichen Wassergehalten (70–97 %). P liegt im Klärschlamm biologisch oder chemisch gebunden vor. Zudem werden bei der Abwasserreinigung Schwermetalle und organische Verunreinigungen über den Klärschlamm aus dem Abwasser entnommen. Um P aus dem Klärschlamm rückgewinnen zu können, sind aufgrund der Eigenschaften des Schlammes komplexe Technologien mit teils hohem

Ressourcenaufwand erforderlich. Die verfahrenstechnischen Ansätze reichen von nasschemischen Leaching- über nassoxidative bis hin zu metallurgischen Technologien (Abb. 9).

3.2.1. Nasschemisches Leaching

Bei nasschemischen Verfahren wird Klärschlamm mit einer Trockensubstanzgehalt von 30 g/kg mit starken Säuren (H_2SO_4 , HCl) behandelt und der P bei tiefen pH-Werten in Lösung gebracht. Damit die bei diesen pH-Werten ebenfalls rückgelösten Schwermetalle nicht zusammen mit dem Endprodukt ausgefällt werden, wurden zwei Verfahren mit unterschiedlichen Ansätzen entwickelt (Gifhorn- und Stuttgarter Verfahren). Der gelöst vor-

liegende Phosphor wird anschließend mittels Mg- oder Ca-Fällmitteln gefällt. Die Kosten für diese Verfahren liegen mit >10 €/kg P um ein Vielfaches über dem Preis von Rohphosphaten. Da der Klärschlamm für diese Verfahren einen hohen Wassergehalt von >95 % aufweisen muss, sind nur dezentrale Konzepte, also eine Rückgewinnungsanlage pro Kläranlage möglich. Das tatsächliche Rückgewinnungspotenzial bezogen auf den Kläranlagenzulauf beträgt 40–50 %. Die Kosten pro Kilogramm rückgewonnenen P liegen bei >10 € (Egle et al. 2014b und c) und damit ein Vielfaches über dem Marktpreis von P (Stand 2015: Rohphosphat (RP): <1 €/kg P, TripleSuperPhosphat (TSP): 1,5–2,0 €/kg P; Weltbank 2015). Die Verfahrenskosten ergeben sich vor allem

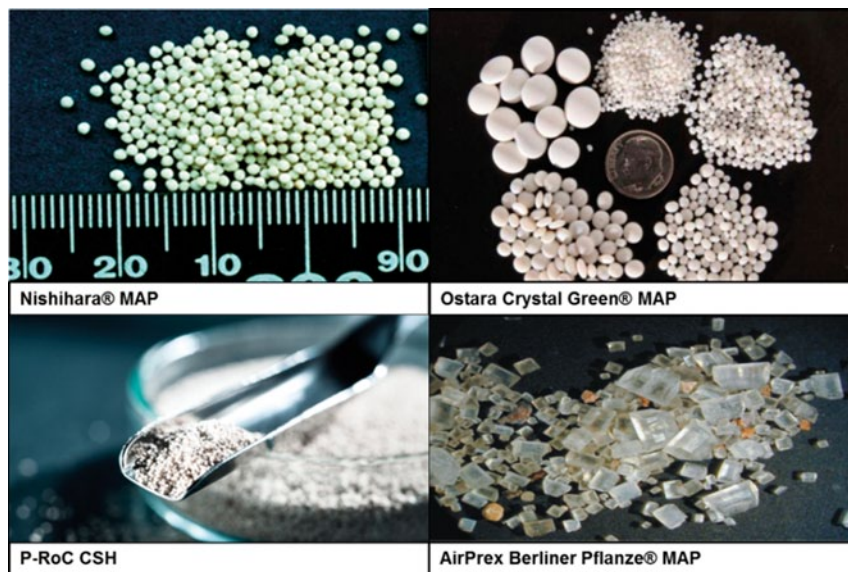


Abb. 8 Beispiele für rückgewonnene P-reiche Produkte aus der flüssigen Phase (Schlammwasser und gelöster P-Anteil im Faulschlamm)

durch die Betriebsmittel (z. B. Säure, Komplexbildner), wodurch das Einsparungspotenzial gering ist.

3.2.2. Nassoxidative Verfahren

Mittels verschiedenster Desintegrationsmaßnahmen – weit verbreitet sind Oxidationsverfahren – wird die Organik des Klärschlammes vollständig zerstört, aufgeschlossen und somit P in Lösung gebracht. Die Prozesse sind sehr komplex. Beim AquaReci®-Verfahren wird der Klärschlamm (~ 10 % TS) in eine überkritische Phase überführt (T: 375 °C, Druck: 220 bar). P kann anschließend als Eisen- oder Calciumphosphat gewonnen werden. Mit geringen Drücken kommt das LOPROX-Verfahren (T: 120–200 °C, Druck: 3–20 bar) aus, wobei wie bei den Leaching-Verfahren vor der Oxidation Säure zugegeben werden muss. Nassoxidative Verfahren haben den Vorteil, dass der Schlamm direkt inertisiert wird, damit z. B. Kosten für die thermische Behandlung entfallen und die Möglichkeit zur Energiegewinnung gegeben ist. Nachteilig ist jedoch, dass diese technologisch noch nicht ausgereift sind. Das Rückgewinnungspotenzial bezogen auf den Kläranlagenzulauf beträgt ca. 40–60 %. Die reinen Verfahrenskosten, ohne mögliche Erträge aus dem Verkauf des Produktes und der Gewinnung von Energie, liegen bei über 20 €/kg P (Egle et al. 2014b und 2014c). Werden jedoch die Erträge aus Produkt- und Energiegewinnung berücksichtigt sowie

das Verfahren als Alternative zu einer Klärschlammverbrennung genutzt (Inertisierung des Schlammes), können diese Technologien aus volkswirtschaftlicher Sicht interessant sein.

3.2.3. Metallurgisch

Bei den metallurgischen Verfahren wird Klärschlamm in ein flüssiges Eisenbad eingebracht, wobei sich P in gewissen Schlackeschichten des Reaktors anreichert. Diese Schlacke wird abgestochen und in ein Wasserbad geleitet, wobei ein grobkörniges granuliertes Endprodukt, ähnlich dem früher bekannten Thomasmehl, entsteht. Schwermetalle reichern sich im Gegensatz dazu im Eisenbad an und werden damit im Endprodukt abgereichert. Bezogen auf den Kläranlagenzulauf beträgt das Rückgewinnungspotenzial rund 70 %. Ähnlich wie bei den nassoxidativen Verfahren sind die reinen Verfahrenskosten hoch (ca. 9 €/kg P) (Egle et al. 2014b und 2014c). Durch die Erträge aus dem Verkauf des anfallenden Produktes, Gewinnung eines nutzbaren Gases sowie der Inertisierung des Klärschlammes kann dieses Verfahren kostenneutral bzw. wirtschaftlich betrieben werden.

3.3. Klärschlammasche

Voraussetzung für eine Rückgewinnung von P aus Aschen ist eine alleinige thermische Behandlung des Klärschlammes (Monoverbrennungsanlagen).

Eine Verbrennung mit anderen Stoffen mit niedrigeren P-Konzentrationen bezogen auf den Aschegehalt als Klärschlamm darf nicht erfolgen. Nur dadurch ist eine Anreicherung des Phosphors in der Asche (60–100 g/kg TS) garantiert. Alternativ können jedoch P-reiche und gleichzeitig schwermetallarme Stoffflüsse wie Tiermehle mitverbrannt werden. Dadurch kann die Asche inputseitig verbessert werden. Organische Verunreinigungen werden nahezu vollständig zerstört. Abb. 10 gibt eine Übersicht über die derzeit bekannten Verfahren zur Rückgewinnung von P aus Klärschlammaschen. Diese Verfahren eignen sich durchaus auch zur Rückgewinnung von P aus anderen P reichen Aschen, wie z.B. Tiermehlaschen.

3.3.1. Bioleaching

Bei diesen Verfahren erfolgt die Rücklösung von P und Schwermetallen über Leachingprozesse mithilfe lithotropher Mikroorganismen. Durch die mikrobielle Produktion von Schwefelsäure werden innerhalb kurzer Zeit Phosphor und Schwermetalle freigesetzt. Phosphor kann anschließend selektiv bakteriell rückgewonnen werden. Für diese Verfahren sind derzeit keine Rückgewinnungspotenziale und Kosten bekannt.

3.3.2. Nasschemische Extraktion

Ziel einer Extraktion ist die Überführung des nicht wasserlöslichen P in der Asche in eine wasserlösliche und damit unmittelbar pflanzenverfügbare Form durch Zugabe von starken Säuren (RecoPhos®, Düngemittelindustrie). Grundlage dafür ist der bekannte Prozess der Düngemittelindustrie. Nicht wasserlösliche Rohphosphate werden dabei entweder mit Schwefel- oder Phosphorsäure vermischt und das anfallende Produkt wird anschließend granuliert. Die gesamte KSA und somit der gesamte P (100 % „Rückgewinnung“) sowie sämtliche Schwermetalle sind Teil des Endproduktes. Durch den Verkauf eines zugelassenen Produktes können Erträge erwirtschaftet werden, welche die Produktionskosten übersteigen. Für die Industrie kann der Einsatz von Klärschlammaschen als Sekundärrohstoff daher wirtschaftlich sinnvoll sein. Bei einer volkswirtschaftlichen Betrachtung müssen die Mehrkosten einer gezielten Klärschlammmonoverbrennung im Vergleich zu einer Klärschlammmitverbrennung mit Aschedeponierung

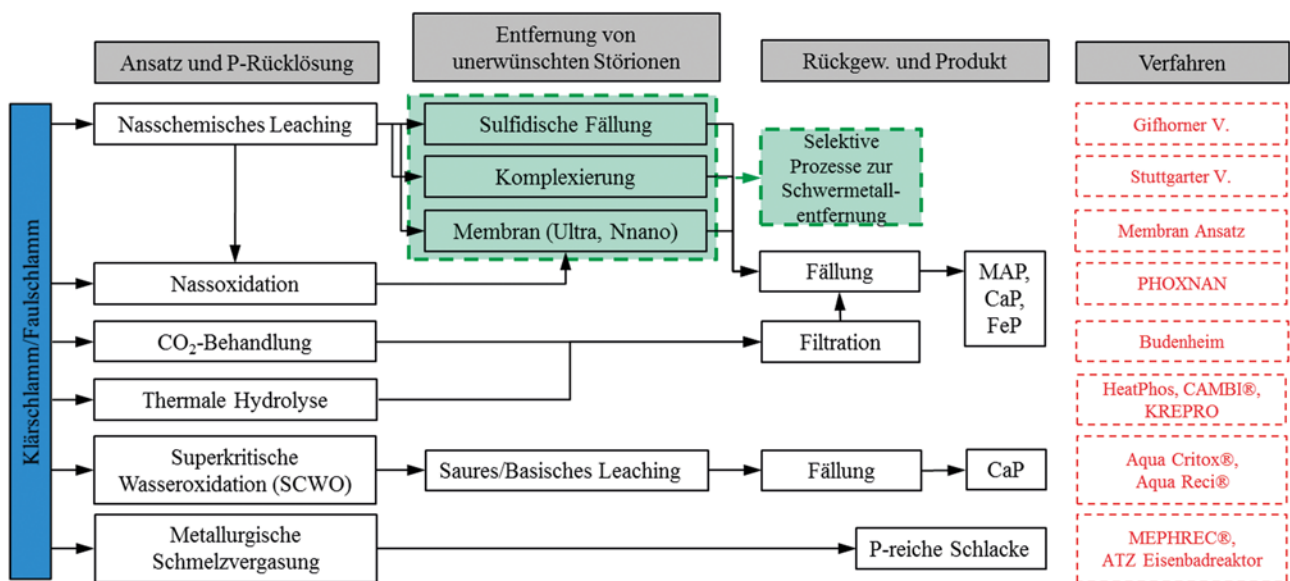


Abb. 9 Übersicht der verfahrenstechnischen Ansätze zur Rückgewinnung von P aus dem Klärschlamm bzw. Faulschlamm

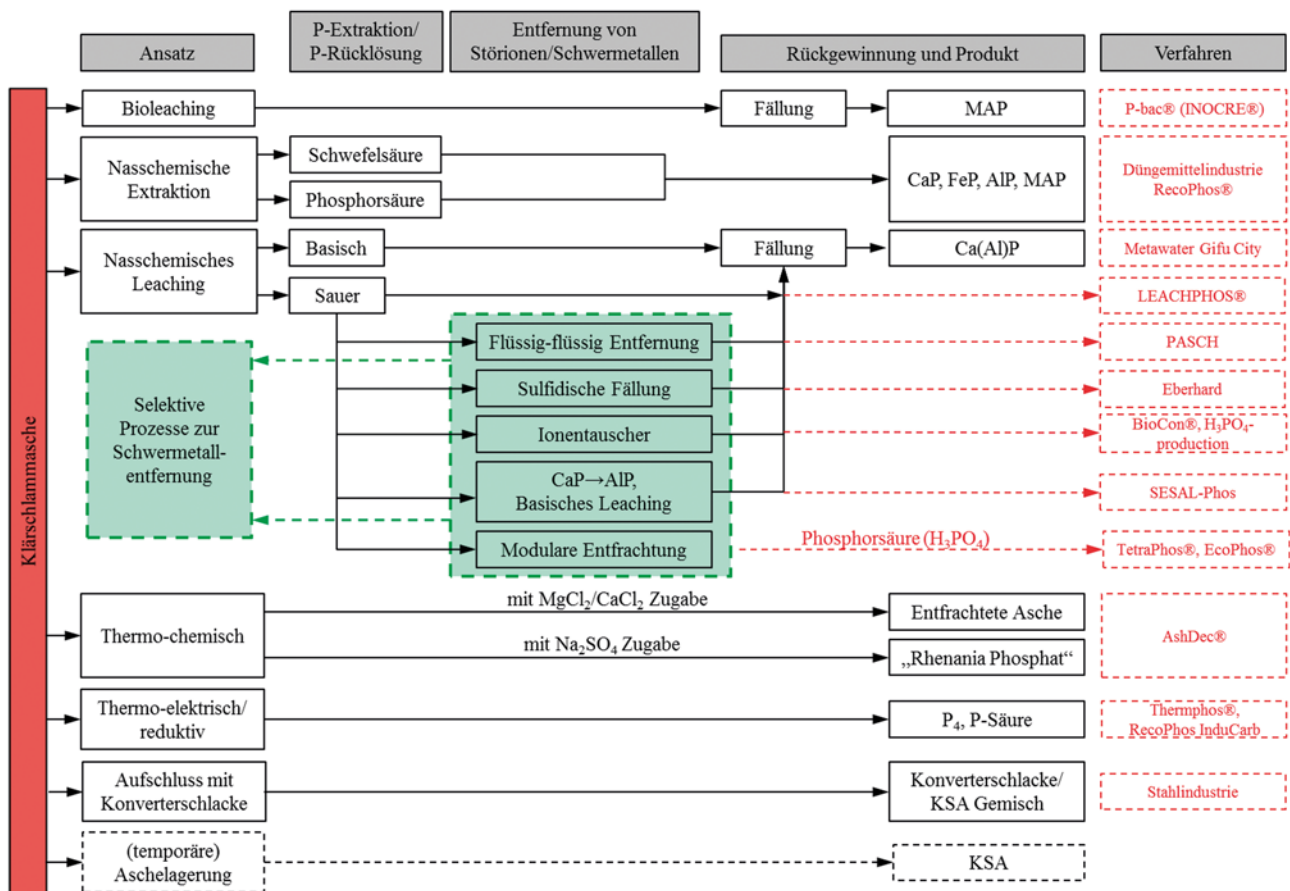


Abb. 10 Übersicht der verfahrenstechnischen Ansätze zur Rückgewinnung von P aus der Klärschlammmasche

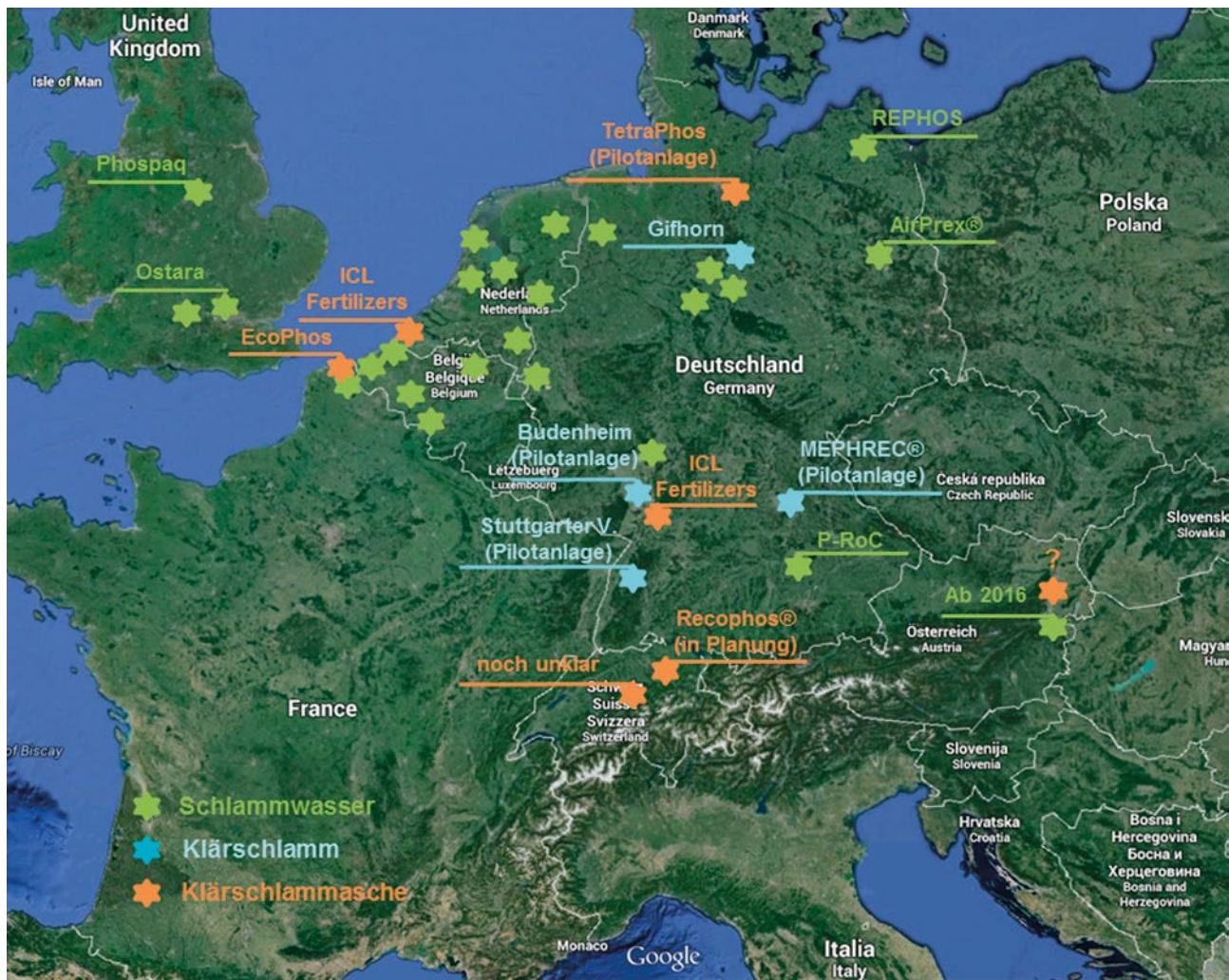


Abb. 11 Übersichtsplan der derzeit umgesetzten und in Planung befindlichen P-Rückgewinnungsanlagen

berücksichtigt werden. Die zusätzlichen Kosten pro Einwohner und Jahr liegen dafür im Bereich von 1 € (Egle et al. 2014b und 2014c) (Vergleich: Abwassergebühren 2013 ca. 150 € pro Einwohner und Jahr; Meister et al. 2014).

3.3.3. Nasschemische Verfahren

Erster Schritt ist die Überführung des gebundenen P in eine gelöste flüssige Form (Leaching mit $\text{HCl}/\text{H}_2\text{SO}_4$ und Wasser). Bis zu 90 % des P können bei pH-Werten von <2 rückgelöst werden. Der Prozess ist jedoch nicht selektiv, wodurch auch Schwermetalle rückgelöst werden. Diese werden durch teils aufwendige Prozessschritte wie Ionenaustauscher, Flüssig-Flüssig-Extraktion oder sequenzielle Fällung abgeschieden (LEACHPHOS®, PASCH, SESAL-PHOS, EcoPhos®). Endprodukte sind teils hochreine Phosphorsäuren (EcoPhos®) oder

verschiedenen Calciumphosphate (z. B. LEACHPHOS®). Abhängig vom Verfahren fallen auf jeden Fall P-arme Asche als Abfallstoff sowie, abhängig von der Art der Schwermetallentfrachtung, verschiedene, teils wiederverwertbare Stoffströme an (Rückgewinnungspotenzial bezogen auf Ascheinput: PASCH, LEACHPHOS®, SESAL-Phos: ~ 80 %, EcoPhos®: 95 %). Die Verfahrenskosten für die thermochemischen Verfahren LEACHPHOS®, PASCH und SESAL-Phos für einen Aschedurchsatz von jährlich 15.000–30.000 t liegen im Bereich von 4–6 €/kg P (Egle et al. 2014b und 2014c). Für diese Verfahren belaufen sich die zusätzlichen volkswirtschaftlichen Kosten auf 2–5 € pro Einwohner und Jahr. Aufgrund der hohen Erlöse für reine Phosphorsäure kann die Integration von Klärschlammaschen in den Prozess für EcoPhos® wirtschaftlich rentabel sein-

3.3.4. Thermo-chemisch

Ziel des AshDec®-Verfahrens ist die Überführung des P in pflanzenverfügbare Form und zum anderen die Entfrachtung der Asche von Schwermetallen durch Zugabe geeigneter Chloride oder Na_2SO_4 (AshDec®). Die Chloride verringern die Verdampfungstemperatur der Schwermetalle und werden über die Gasphase (Rauchgas) abgeschieden. Mit Na_2SO_4 anstelle der Chloride kann eine deutlich verbesserte Pflanzenverfügbarkeit der Asche nachgewiesen werden, obgleich die Entfrachtung der Schwermetalle deutlich geringer ist (Rhenaniaphosphat). Bei diesem Prozess entstehen dabei zwei Materialströme: 1) Asche mit hohen Phosphorkonzentrationen (98 % des P verbleibt in der Asche), Schwermetall (teilweise) entfrachtet, 2) Rauchgas mit Schwermetallen beladen (Behandlung Rauchgasreinigung → Filterkuchen). Die Verfahrenskosten für die thermo-

Tab. 2 Übersicht zu relevanten Plattformen, Interessensgemeinschaften und Foren zum Thema Phosphor

Europäische Phosphorplattform	http://www.phosphorusplatform.eu/
Deutsche Phosphor-Plattform	http://www.deutsche-phosphor-plattform.de/
Niederländische Nährstoffplattform	http://www.nutrientplatform.org/
Belgisch-Flämische Nährstoffplattform	Keine Homepage
Global TraPs: Transdisciplinary processes for sustainable Phosphorus management	http://www.globaltraps.ch/
Global Phosphorus Research Initiative	http://phosphorusfutures.net/
SNB Phosphate Recovery	http://www.phosphaterecovery.com/

chemischen Verfahren für einen Asche-durchsatz von 15.000–30.000 t/a liegen im Bereich von 1–2 €/kg P (Egle et al. 2014b und 2014c). Abhängig von den möglichen Erlösen für eine entfrachtete Asche oder ein mögliches Produkt (Rhenaniaphosphat) liegen die zusätzlichen volkswirtschaftlichen Kosten im Bereich von 0,5–1,5 € pro Einwohner und Jahr.

3.3.5. Aufschluss in Konverterschlacke

Bei diesem Ansatz werden P-reiche Klärschlamm- oder Tiermehlaschen im Konverter zur LD-Schlacke (1.600 °C) zugegeben und der Wärmeinhalt wird zum thermochemischen Aufschluss bzw. zur Umlagerung der Mineralphase und damit der Phosphorverbindungen der Asche genutzt. Erste Untersuchungen zeigen, dass die Zitronensäurelöslichkeit und damit auch die Pflanzenverfügbarkeit deutlich verbessert werden kann. Durch die Vermischung mit Konverterschlacke wird der hohe P-Gehalt der Asche stark verdünnt und sämtliche Schwermetalle aus der KSA sowie der Konverterschlacke sind Teile des entstehenden „Produktes“. Kosten können aufgrund des aktuellen Entwicklungsstands nicht erhoben werden.

4. Rechtliche Grundlagen und damit verbundene Herausforderungen für ein P-Recycling

Grundsätzliche Anforderungen an Düngemittel sind deren Reinheit, die bekannte, gleichbleibende Zusammensetzung sowie die gleichbleibende Qualität. Für die Zulassung als Düngemittel sind in Österreich die Anforderungen laut Düngemittelverordnung (DüngemittelVO 2004, Fassung vom 28.10.14) zu erfüllen. Geregelt wird dies durch das Düngemittelgesetz (DMG 1994). Damit eine Zulassung auf EU-Ebene möglich ist und als EG-Düngemittel deklariert werden kann, muss das Produkt den Anforderungen der Verordnung (EG) Nr.

2003/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates über Düngemittel (ABl. Nr. L 304 vom 21.11.2003, S 1) genügen.

4.1. Düngemittelgesetz

Vom Geltungsbereich des Düngemittelgesetzes (DMG 1994) ausgenommen sind laut § 4 unter anderem (3) Abfälle gemäß Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002) sowie die Verwertung von Abwässern und Abfällen, wie Klärschlamm, Klärschlammkompost, Fäkalien und Müllkompost und (4) Verbrennungsrückständen. Klärschlammaschen sind Verbrennungsrückstände und fallen somit nicht in den Geltungsbereich des Düngemittelgesetzes. Damit ist für diese Abfälle keine Zulassung als Düngemittel möglich.

4.2. Düngemittelverordnung

Düngemittel werden laut Düngemittelverordnung (DüngemittelVO AUT 2004) abhängig von ihrem Nährstoffgehalt und ihren Ausgangsstoffen in verschiedene Typen untergliedert. Endprodukte aus den P-Rückgewinnungsverfahren oder P-reiche Klärschlammaschen entsprechen aufgrund der hohen P-Gehalte und der Löslichkeit der Phosphatverbindung am ehesten einem mineralischen Phosphatdünger (Mindestgehalt: > 10 % P₂O₅).

Neue Produkte müssen vor der Vermarktung mittels Bescheid laut Düngemittelverordnung zugelassen werden. Für eine Einstufung als mineralischer Phosphatdünger sind beispielhaft folgende Ausgangsstoffe zugelassen (Auszug): „Gemahlene, teil- oder vollaufgeschlossene Rohphosphate, Phosphorsäure, Magnesiumphosphat, Monocalciumphosphat, mineralisches Dicalciumphosphat, Tricalciumphosphat, Alkalicalciumphosphat usw. Recyclate oder P-reiche Aschen sind nicht angeführt und daher derzeit nicht als Ausgangsstoff freigegeben.

Im Vergleich dazu sind beispielhaft in Deutschland „Aschen aus Klärschlämmen“ bereits als Düngemittel zugelassen, insofern die vorgeschriebenen gesetzlichen Grenzwerte eingehalten werden (DüngemittelVO GER). In den Niederlanden wurden Klärschlammaschen vom Düngemittelhersteller ICL Fertilizer bereits als Sekundärrohstoff für die Herstellung von Mineraldüngern eingesetzt (TenWolde 2013). Das auf der Berliner Kläranlage in Waßmannsdorf produzierte MAP wurde bereits nach Europäischer Düngemittelverordnung Nr. 2003/2003 zugelassen und wird regional vermarktet (Berliner Pflanze) (Heinzmann und Lengemann 2011).

Die europäische Düngemittelverordnung wird derzeit überarbeitet. Aus den letzten Mitteilungen der EU-Kommission wird ersichtlich, dass zahlreiche Neuerungen u. a. im Umgang mit alternativen P-haltigen Stoffen wie Klärschlamm, Klärschlammaschen sowie recycelten Produkten wie Struvit/MAP zu erwarten sind. Beispielhaft sollen zukünftig reine Klärschlammaschen oder recyceltes Struvit als Typ/Ausgangstoff zur Herstellung oder direkt als mineralhaltiges Düngemittel zugelassen werden (Embert 2014; Thornton 2015). Die überarbeitete Düngemittelverordnung wird für 2017 erwartet. Diese Verordnung ist ein Rechtsakt, der nach seiner Verabschiedung in Österreich unmittelbar Geltung hat und die bestehende österreichische Düngemittelverordnung ersetzt.

4.3. Abfallwirtschaftsgesetz

Die bei der Monoverbrennung von Klärschlamm anfallenden Flugaschen (= Klärschlammaschen) werden als nicht gefährliche Abfälle eingestuft. Zu beantworten ist, ab wann z. B. reine Klärschlammasche oder andere Abfälle das Abfallregime durch ein geeignetes Aufbereitungsverfahren verlassen und was als handelsfähiges Produkt angesehen wird (Abfallende). Laut § 5 des AWG (2002) „gelten Altstoffe so lange als Abfälle, bis sie oder die aus ihnen gewonnenen Stoffe unmittelbar als Substitution von Rohstoffen oder von aus Primärrohstoffen erzeugten Produkten verwendet werden. Im Falle einer Vorbereitung zur Wiederverwendung im Sinne von § 2 Abs. 5 Z 6 ist das Ende der Abfalleigenschaft mit dem Abschluss dieses Verwertungsverfahrens erreicht“. Setzt beispielsweise ein Düngemittelhersteller P-reiche Klärschlamm-

aschen als Substitut für Rohphosphate (Primärrohstoff) ein und erzeugt daraus ein handelsfähiges Produkt, ist das Ende der Abfalleigenschaft erreicht. Damit ein Düngemittelhersteller Aschen annehmen kann, muss das Unternehmen eine Genehmigung zur Abfallannahme beantragen.

5. Bestrebungen und rechtliche Rahmenbedingungen zur P-Rückgewinnung in der EU

5.1. Mitteilungen der Europäischen Kommission, europäische P-Forschungsprojekte und P-Initiativen

Auf europäischer Ebene wird das Thema Phosphor intensiv diskutiert. In der konsultativen Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen weist die Kommission auf die nachhaltige Verwendung von Phosphor im Hinblick auf die Landwirtschaft (Erosion, organische Düngemittel wie Güllemanagement), den Gewässerschutz (Eutrophierung) und das ungenutzte P-Potenzial in Abfällen hin (Abwasser, Lebensmittelabfälle) (EK 2013). Zudem wurde Rohphosphat von der EU in die Liste der kritischen Ressourcen aufgenommen (EK 2014).

Im Rahmen des europäischen **P-REX**-Projekts (P-REX 2015) wurden Technologien zur Rückgewinnung von Phosphor auf ihre Realisierbarkeit untersucht. Ziel war es, die besten Optionen zur P-Rückgewinnung in Abhängigkeit von regionalen Gegebenheiten zu identifizieren sowie bestehende Wissenslücken zu schließen. Technologien und die dabei rückgewonnenen Produkte wurden dabei umfassend bewertet.

Mit **DONUTSS** (Data on Nutrients to Support Stewardship; Europäische P-Plattform und DG Growth) wurde ein Projekt gestartet, um die bekannten und notwendigen Datengrundlagen von Nährstoffflüssen und Lagern in der Industrie und der Landwirtschaft zu identifizieren. Entscheidungsträger sollen damit über fundierte Daten verfügen, auf deren Grundlage eine Verbesserung der Kreislaufwirtschaft für P, N und weitere Nährelemente aufgebaut werden soll. Diese Daten sollen im Sinne eines Monitorings überwacht werden.

Nicht direkt im Zusammenhang mit einer P-Rückgewinnung steht die Diskussion über Cadmium in Düngemitteln.

Von der „Chemicals Unit of DG Enterprise and Industry“ wird aktuell eine Risikobewertung zum Thema Cadmium in Rohphosphaten und Mineraldüngern vorgenommen. Abhängig von den Ergebnissen ist z. B. zukünftig eine Entfrachtung von Cadmium vorzusehen, was sich wiederum auf den Preis für Rohphosphate auswirken würde.

Europa- und weltweit haben sich zahlreiche Interessensgemeinschaften und Plattformen mit dem gemeinsamen Ziel der sinnvollen und nachhaltigen Nutzung der Ressource P formiert. Tab. 2 stellt die bekanntesten überblicksweise dar.

5.2. Konkrete Beispiele zur Förderung der Rückgewinnung von P aus dem Abwasser

5.2.1. Deutschland

In Deutschland wurde bereits 2004 mit gezielten Förderinitiativen der Fokus auf das Thema P und dessen sinnvolle Nutzung gelegt. Ende 2011 wurden mit den Ergebnissen der Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe insbesondere Phosphor“ die Grundlagen für die weitergehende Forschung gelegt (Pinnekamp und Wiebke 2011). Mit dem nationalen Ressourceneffizienzprogramm („ProgRes“) hat die deutsche Bundesregierung die besondere Bedeutung von P für die Ernährungssicherung hervorgehoben und sich für verstärkte Anstrengungen bei der Nutzung sekundärer Phosphorquellen, unter anderem auch aus Klärschlämmen, ausgesprochen.

Im Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD zur 18. Legislaturperiode (2013) wurde festgehalten: „Wir werden die Klärschlammausbringung zu Düngezwecken beenden und Phosphor und andere Nährstoffe zurückgewinnen.“ Mit der aktuell vorliegenden Neufassung der deutschen Klärschlammverordnung wird eine Neuausrichtung der Verwertung von Klärschlämmen, Klärschlammgemischen und Klärschlammkomposten eingeleitet und damit den Forderungen im Koalitionsvertrag Rechnung getragen. Ziel der Verordnung ist mittelfristig ein flächendeckender Einsatz technischer Phosphorrückgewinnungsverfahren. Durch den Einsatz von Technologien sollen die mit einer herkömmlichen Klärschlammaufbringung verbundenen Stoffeinträge in den Boden weiter verringert werden. Bei der Verwendung des zurückgewonnenen Phosphors steht eindeutig die Nutzung zu Düngezwecken

im Vordergrund. Das rückgewonnene Material soll daher vorrangig in pflanzenverfügbarer und schadstoffarmer Form vorliegen oder vor der Nutzung so weit aufbereitet werden, dass die Pflanzenverfügbarkeit gewährleistet ist. Derzeitige Überlegungen (Auszüge aus Bergs 2014):

- Ab 2025 Aufbringungsverbot für Klärschlämme aus Abwasserbehandlungsanlagen Größenklassen 3 bis 5 (5.001 – > 100.000 EW).
- Mitverbrennung nur mehr für Klärschlämme mit < 20 g P/kg TS bzw. wenn vorher mind. 50 % P aus dem Klärschlamm rückgewonnen wurde.
- Aus Klärschlämmen mit einem P-Gehalt > 20 g/kg TS muss P verpflichtend rückgewonnen werden. Entweder direkt aus dem Klärschlamm oder aus der Klärschlammasche.
- Schlämme, die in Monoverbrennungsanlagen eingesetzt werden → unabhängig vom P-Gehalt der Klärschlämme: Pflicht zur unmittelbaren Aufbereitung zu Düngemittel oder Separatlagerung der Aschen.
- Klärschlämme können mit weiteren Klärschlämmen bei der Monoverbrennung vermischt werden, wenn der P-Gehalt > 20 g/kg TS ist.

Weiterführende Forschung zum Thema P-Rückgewinnung in Deutschland:

- ZwiPhos – Entwicklung eines Zwischenlagerungskonzepts für Klärschlammonoverbrennungsaschen (Pinnekamp et al. 2014).
- KoMa – Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz (Montag et al. 2014).
- Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotenziale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik (Krüger und Adam 2014).

5.2.2. Schweiz

Generell gilt in der Schweiz bereits seit dem Jahr 2006 ein striktes Ausbringungsverbot von Klärschlamm in der Landwirtschaft.

Am Areal des Klärwerkes Werdhölzli (Zürich) wurden Ende 2015 die Bauarbeiten für die zentrale Klärschlammverwertungsanlage beendet. Ab sofort wird der gesamte im Kanton Zürich

anfallende Klärschlamm (ca. 100.000 t entwässerter Klärschlamm) thermisch behandelt. Eine vorangehende Trocknung des Klärschlammes ermöglicht die eigenständige Verbrennung des Klärschlammes (Monoverbrennung), was für eine spätere P-Rückgewinnung erforderlich ist. Die endgültige Auswahl für eine Rückgewinnungstechnologie wurde noch nicht getroffen. Nach letzten Informationen wird nicht das eigens entwickelte nasschemische LEACHPHOS®-Verfahren umgesetzt, sondern auf eine industrielle Verwertung der Asche gesetzt. Bis dahin wird die anfallende Klärschlamm-Asche für eine spätere Rückgewinnung in einer Monodeponie zwischengelagert (Morf 2015).

Im Regierungsratsbeschluss 572/2007 wurde festgehalten, dass „...der *„Bau von neuen Anlagen, so auszurichten ist, dass die (spätere) Rückgewinnung des Wertstoffes Phosphor möglich ist...“* (Morf 2015).

Von der rechtlichen Seite wurden in der Schweiz phosphorhaltige Abfälle in die TVA (Technische Verordnung über Abfälle) aufgenommen. In Artikel 15 wird der Umgang mit phosphorreichen Abfällen wie folgt geregelt:

1. *Phosphorreiche Abfälle aus kommunalem Abwasser, aus Klärschlamm zentraler Abwasserreinigungsanlagen oder aus der Asche aus der thermischen Behandlung von solchem Klärschlamm ist Phosphor nach dem Stand der Technik zurückzugewinnen und stofflich zu verwerten.*
2. *In Tier- und Knochenmehl enthaltener Phosphor ist nach dem Stand der Technik stofflich zu verwerten.*
3. *Soll der phosphorhaltige Rückstand als Dünger verwendet werden, so sind bei der Rückgewinnung des Phosphors Schadstoffe so weit zu entfernen, dass der Dünger die Anforderungen von Anhang 2.6 Ziffer 2.2 der Chemikalien-Risikoreduktionsverordnung vom 18. Mai 2006 (ChemRRV) erfüllt.*

Nach Artikel 50 gilt die Pflicht zur Rückgewinnung von Phosphor 5 Jahre nach Inkrafttreten dieser Verordnung. Dieses wird mit 1. Januar 2016 erwartet, womit ab 2021 die Verordnung über die P-Rückgewinnung in Kraft treten wird (BAFU 2015).

Beispielhaft wird in der Deponie Elbisgraben (Liestal) bereits Klärschlamm-Asche in separaten Kompartimenten einer Reststoffdeponie abgelagert. Die Betriebserfahrungen zeigen, dass

der Einbau der Klärschlamm-Asche keine Probleme verursacht. Problemlos ist auch das Sickerwasser, welches nach Angaben der Betreiber keine chemischen Auffälligkeiten zeigt (UMTEC 2009).

5.2.3. Niederlande

Eine landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes wird in den Niederlanden aufgrund der sehr niedrigen Grenzwerte des aus der Massentierhaltung ausreichend zur Verfügung stehenden Wirtschaftsdüngers und der geringen Akzeptanz der Bevölkerung faktisch nicht praktiziert. Die Hälfte der jährlich in den Niederlanden anfallenden Schlammmenge von 1,5 Mio. t (24% TS) wird in zwei Monoverbrennungsanlagen (SNB Moerdijk und HVC) thermisch behandelt (Lefferts 2012).

Sehr früh wurden in den Niederlanden Konzepte zur Rückgewinnung von P aus Klärschlamm-Aschen verfolgt. Die Firma Thermphos® integrierte eisenarme Aschen bereits Anfang der 2000er-Jahre in ihren thermo-elektrischen Prozess zur Herstellung von reinem Phosphor (P₄) (Schipper et al. 2001). Mit dem Konkurs von Thermphos® endete dieser Verwertungsweg. Gleichzeitig wurde ICL Fertilizer Europa, der größte PK-Dünger (Phosphor und Kalium)-Hersteller Europas, auf die Klärschlamm-Aschen aufmerksam und nutzte diese ebenfalls als Sekundärrohstoff. Geplant ist, dass 10–15% des Rohmaterialbedarfs an Phosphatgestein durch Klärschlamm-Asche substituiert werden. Eine Herausforderung sind dabei die hohen Gehalte an Eisen bzw. Aluminium, welche über die Fällmittel bei der Abwasserreinigung in den Klärschlamm und anschließend in die Klärschlamm-Asche gelangen.

Derzeit erforscht auch EcoPhos® (Herstellung von Phosphorsäure für Futter-, Nahrungsmittel- und Düngemittelindustrie) die Nutzung von Klärschlamm-Aschen in ihrem Prozess. Bisher wurde die EcoPhos®-Technologie hauptsächlich auf „Low Grade“-Phosphaterze angewendet. Low-Grade-Erze weisen geringere P-Gehalte bei gleichzeitig höheren Schwermetallgehalten auf. Im März 2015 erfolgte die Vertragsunterzeichnung zwischen SNB und EcoPhos® (SNB 2015). Zukünftig soll in Dünkirchen (Frankreich) aus den jährlich anfallenden 50.000–60.000 t Klärschlamm-Asche der beiden Monoverbrennungsanlagen der Niederlande Phosphorsäure produziert werden (EcoPhos 2015; DeRuiter 2014).

5.2.4. Österreich

Im Gegensatz zu den Nachbarländern Deutschland und Schweiz sind in Österreich keine rechtlich verbindlichen Vorschriften in Bezug auf ein gezieltes P-Recycling gegeben. Dennoch befassen sich Forschungseinrichtungen und Interessensgemeinschaften intensiv mit dieser Thematik. So wurden bereits zwei Technologien zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm-Aschen in Österreich entwickelt. In Leoben wurde das ASHDEC®-Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus bzw. Entfrachtung von Schwermetallen der Klärschlamm-Asche zur Anwendungsreife gebracht (Adam 2009). Mit diesem Verfahren konnte im Pilotmaßstab bereits ein zugelassener Handelsdünger (PhosKraft®) produziert werden. Nach der Insolvenz wurde ASHDEC von OUTOTEC (Finnland) übernommen.

An der Montanuniversität Leoben wird aktuell im Rahmen eines EU-Projekts an einer Pilotanlage zur Rückgewinnung von P aus der Klärschlamm-Asche geforscht (RecoPhos-InduCarb-Prozess). Grundprozess ist die Reduktion von Phosphaten durch Zugabe von Kohlenstoff (Koks) und Silizium (SiO₂) im „Wöhler Prozess“ bei Temperaturen >2.000 °C zu reinem P. P wird in die Gasphase überführt und kann anschließend als reines P₄ oder in weiterer Folge als Phosphorsäure rückgewonnen werden (Steppich 2015).

Am Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft der Technischen Universität Wien wurden vergleichende Bewertungen der gegenwärtig verfügbaren P-Rückgewinnungsverfahren aus dem Abwasser angestellt. Anhand von technologischen, ökologischen und ökonomischen Kriterien wurden die Verfahren ganzheitlich bewertet, was als Grundlage für zukünftige Bewilligungsverfahren dienen sollen. Im Zuge dieses Projekts wurden zudem praktische Laborversuche für zahlreiche Rückgewinnungstechnologien (Schlammwasser, Klärschlamm, Klärschlamm-Asche) durchgeführt (Egle et al. 2014b).

Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Studie wurde für die Stadt Wien eine Konzept- und Machbarkeitsstudie zur zukünftigen stofflichen Verwertung der Klärschlamm-Aschen der Fernwärme Wien mit positiven Ergebnissen abgeschlossen (Egle et al. 2015). In einem weiteren Projekt unter der wissenschaftlichen Leitung der TU Wien wird ab 2016 die erste P-Rückgewinnungsanlage auf einer Kläranlage im Süden von Wien errichtet. Dabei wird der im Faulschlamm

gelöst vorliegende P (PO_4^{3-}) gezielt als Struvit ausgefällt. Dies hat positive Auswirkungen auf die Nährstoffrückbelastung in der Anlage, unkontrollierte Ablagerungen können vermieden werden und die Entwässerbarkeit des Schlammes wird deutlich verbessert. Die Rückgewinnung des P-reichen Struvit kann dabei als ein zusätzlicher Benefit angesehen werden.

Vom ÖWAV (Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband) wurde das Positionspapier „Klärschlamm als Ressource“ verfasst. Damit soll eine verantwortungsvolle Nutzung der Ressource Klärschlamm vorangetrieben werden. Dieses Positionspapier behandelt die Ressourcenpotenziale des Klärschlammes, die anorganischen und organischen Verunreinigungen und die Verfahren zur Nutzung der Wertstoffe des Klärschlammes. Es stellt die technisch-naturwissenschaftliche Bewertung der Nutzungsoptionen dar und gibt einen Überblick über internationale Entwicklungen. Zudem werden Empfehlungen für die künftige Nutzung von Klärschlamm abgegeben (ÖWAV 2014). Aufbauend auf diesem Positionspapier befasst sich aktuell eine weitere Arbeitsgruppe (AG1) der Klärschlammplattform mit dem Thema „Klärschlamm in einem optimierten P-Management“. Ziel dieser AG ist es, die richtigen Fragen zu stellen, warum die kritische Ressource P nicht wie eine dementsprechende behandelt wird. Zudem sollen Hindernisse und Hemmnisse identifiziert werden (z. B. gesellschaftlich, rechtlich), die einer zukünftigen P-Rückgewinnung entgegenwirken.

5.3. Übersicht der Standorte von Rückgewinnungsverfahren in Europa

Europaweit wurden bereits zahlreiche Verfahren zur P-Rückgewinnung, im Pilot- als auch im großtechnischen Maßstab, umgesetzt oder befinden sich in Planung. Anhand von Abb. 11 wird deutlich, dass bisher vor allem Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus der flüssigen Phase einer Kläranlage umgesetzt wurden (siehe Kapitel 3.1.). Begründet werden kann dies durch einen geringen technologischen Aufwand und die positiven Auswirkungen dieser Verfahren auf die Kläranlage (Vermeidung von unerwünschten Ablagerungen, verringerte Nährstoffrückbelastung und Verbesserung der Entwässerungsleistung). Zur Rückgewinnung von P aus

dem Klärschlamm wurden 4 Anlagen im Pilotmaßstab realisiert. Es handelt sich dabei um die beiden nasschemischen Leachingverfahren Gifhorn und Stuttgarter Verfahren, ein Verfahren zur Rückgewinnung von P durch den Einsatz von CO_2 (Budenheim-Verfahren) sowie das metallurgische MEPHREC®-Verfahren (Scheidig et al. 2013). Zur Rückgewinnung von P aus der Asche sind derzeit nur die beiden industriellen Prozesse ICL Fertilizers® bzw. EcoPhos® umgesetzt bzw. in Planung. Ähnlich dem Verfahren von EcoPhos® wird in Hamburg derzeit von Remondis® eine Pilotanlage, ebenfalls zur Rückgewinnung von P-Säure, errichtet (TetraPhos®). In Bazenheid (Schweiz) ist die Umsetzung des RecoPhos®-Verfahrens (nasschemische Extraktion) angedacht. Für Zürich, wo derzeit die anfallenden Klärschlammaschen separat abgelagert werden, wurde noch keine Entscheidung hinsichtlich einer Technologie getroffen (siehe Kapitel 5.2.2.).

6. Zusammenfassung

Darüber, dass Phosphor (P) ein lebensnotwendiges, endliches und damit kritisches Element ist, herrscht in der Fachwelt weitgehend Konsens. P-Bilanzen belegen, dass P gegenwärtig ineffizient und nicht wie ein kritisches Element genutzt wird. Infolge der Abhängigkeiten von Rohphosphat- und Phosphorsäureimporten ist Österreich vollständig von der Verfügbarkeit und Entwicklungen an den internationalen Rohstoffmärkten abhängig. Die Importe stammen überwiegend aus geopolitisch instabilen Regionen mit teils deutlich niedrigeren Umweltstandards, was zu einer Verlagerung von Umweltbelastungen führt (z. B. Phosphorgips).

Betrachtet man die beiden Abfälle Klärschlamm und Tiermehl, mit welchen theoretisch 90–100 % der jährlich in der Landwirtschaft aufgebrauchten P-Fracht in Form von Mineraldüngern substituiert werden könnte, ist die zukünftige Nutzung und Kreislaufführung alternativer, häufig noch ungenutzter P-reicher Sekundärrohstoffe sinnvoll. Dabei sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass die P-Rückgewinnung nur eine Maßnahme von vielen zur effizienteren Nutzung von P ist.

Um aus den Teilströmen einer Kläranlage und/oder aus dem Tiermehl ein sauberes und pflanzenverfügbares Produkt zu erzeugen, wurde in den letzten Jahren intensiv an der Entwicklung neuer Technologien gearbeitet. Diese sind technisch vielfach bereits so weit fort-

geschritten und beherrschbar, dass eine großtechnische Umsetzung möglich ist oder bereits umgesetzt wurde (v. a. Rückgewinnung aus dem Schlammwasser). Technologien zur Rückgewinnung von P aus dem Schlammwasser sind wirtschaftlich. Das bedeutet, dass die Erlöse bzw. Einsparungen die Verfahrenskosten übersteigen und über den Nutzungszeitraum einer Technologie Erträge erwirtschaftet werden. Im Hinblick auf eine weitgehende Nutzung des vorhandenen P-Potenzials aus dem Abwasser zeigt sich, dass in erster Linie die Verfahren zur Rückgewinnung aus reinen Klärschlamm/Tiermehlaschen die besten Voraussetzungen haben. Gegenwärtig wird dies in Österreich nicht praktiziert und es müssten durch eine Umstellung von bestehenden Verbrennungsanlagen oder deren Neubau zuerst jene Strukturen geschaffen werden, die eine Rückgewinnung aus Aschen ermöglichen. Die zusätzlichen Kosten im Vergleich zu einer direkten landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung oder Co-Verbrennung der Schlämme müssen dabei berücksichtigt werden. Ein Vorteil einer entsprechenden Strategie wäre bei Umsetzung in zentralen großen Einheiten die Möglichkeit der Integration von thermisch zu behandelndem Tiermehl (Kategorie 1) in das Verbrennungs- und Rückgewinnungskonzept und eine bessere Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu nasschemischen Leaching-Rückgewinnungsverfahren aus dem Klärschlamm, die an die einzelnen Kläranlagenstandorte gebunden wären.

Viele neu entwickelte Technologien zur P-Rückgewinnung aus der Schlamm- und Aschephase haben den letzten Schritt zur großtechnischen Umsetzung z. B. aus Kostengründen oder der ungeklärten Entsorgung entstehender Abfallstoffe noch nicht geschafft. Gleichzeitig kann international beobachtet werden, dass die Düngemittelindustrie (Beispiel ICL Fertilizers®) oder Rohstoffhersteller (EcoPhos® Phosphorsäure) zunehmend Interesse an den Sekundärrohstoffen Klärschlammasche oder bereits rückgewonnenen Recyclaten wie Struvit zeigen. Die Machbarkeit einer Integration dieser P-Quellen und die Herstellung marktfähiger Handelsprodukte konnten bereits großtechnisch gezeigt werden. Ein Vorteil einer Integration der Recyclate, Klärschlamm- aber auch Tiermehlaschen besteht in der Nutzung bestehender Absatzwege (P-Rückgewinnung und Recycling). Zudem entfallen die Investitionskosten für spezifisch einzu-

richtende Rückgewinnungsverfahren sowie das Risiko bei der Errichtung neuer Technologien. Allerdings müssen die zusätzlichen Kosten für eine Monoklärschlammverbrennung oder gemeinsame Verbrennung von Klärschlamm und Tiermehl mitberücksichtigt werden. Diese liegen in der Größenordnung von rund 1 € pro Einwohner und Jahr. Im Vergleich dazu betrug die durchschnittlichen Abwasserentsorgungsgebühren in Österreich im Jahr 2013 ca. 150 € pro Einwohner (Meister et al. 2014). Allgemein gilt, dass bei den aktuellen Marktpreisen für P für die Implementierung einer Rückgewinnung und Verwertung von P aus dem Klärschlamm- bzw. der Klärschlammasche abseits einer direkten landwirtschaftlichen Verwertung mit volkswirtschaftlichen Mehrkosten von 1 bis 5 € pro Bürger und Jahr im Vergleich zu einer Entsorgung der Klärschlammasche auf einer Deponie zu rechnen ist.

Betrachtet man die Fortschritte europaweit, sollte in Österreich auf höchster Ebene ein politischer Diskurs über die Ressource P und dessen gezielte Rückgewinnung beginnen. Die Hindernisse für die derzeit scheiternde Umsetzung müssten identi-

fiziert und Lösungswege aufgezeigt werden. Ein erster wichtiger Schritt wäre ein Erkenntnis zur gezielten P-Rückgewinnung mit verbindlichen Vorgaben (siehe Beispiel Deutschland oder Schweiz). Eine Analyse der Gesetze und Verordnungen für Düngemittel in Österreich zeigt, dass diese in ihrer aktuellen Fassung einer Umsetzung zur Rückgewinnung aus P-reichen Abfällen wie z. B. Klärschlammaschen hinderlich sind. Folglich wären hier entsprechende Änderungen erforderlich (z. B. Aufnahme des nicht gefährlichen Abfalls Klärschlammasche in den Geltungsbereich des Düngemittelgesetzes und Aufnahme als Ausgangsstoff für P-haltige Mineraldünger in die Düngemittelverordnung). Darüber hinaus sind Maßnahmen wie beispielsweise die ordnungsrechtliche Festsetzung von Recyclingphosphorquoten für die Düngemittelindustrie (z. B. P_{xx}), ähnlich der Förderung von Biokraftstoffen (Stichwort E10), denkbar. In Anlehnung an den „Wassercent“ in Deutschland könnten beispielsweise über eine Entgelterhöhung für die Abwasserreinigung oder Abfallentsorgung („Phosphorcent“) Projekte zur P-Rückgewinnung gefördert werden. Im Zuge der Diskussion um Mehrkosten für

ein zukünftiges P-Recycling müssen zwei wesentliche Punkte mitberücksichtigt werden:

1. Die niedrigen Preise für Rohphosphate, Phosphorsäure und in weiterer Folge Mineraldünger sind nur möglich, weil ärmere Länder ausgebeutet und die teils negativen Umweltauswirkungen vor Ort akzeptiert werden. Die externen Kosten sind in diesem Preis nicht enthalten. Hier sollten entwickelte Industrienationen zu ihrer (sozialen) Verantwortung stehen.
2. Durch die P-Rückgewinnung kann die auf mehreren Ebenen problematische Abhängigkeit von Importen signifikant reduziert werden. Gleichzeitig können nationale Wertschöpfungsketten etabliert werden.

Open Access

Dieser Artikel unterliegt den Bedingungen der Creative Commons Attribution License. Dadurch sind die Nutzung, Verteilung und Reproduktion erlaubt, sofern der/die Originalautor/en und die Quelle angegeben sind.

Literatur

- Abma, W.R., Driessen, W., Van Loosdrecht, H. (2010): Upgrading of wastewater treatment plant by sustainable and cost-effective separate treatment of industrial wastewater. *Water Sci. Technol.* 61 (7), 1715–1722.
- Adam, C., Peplinski, B., Michaelis, M., Kley, G., Simon, F.-G. (2009): Adam Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery. *Waste management* 29, pp. 1122–1128.
- AWG (2002): Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002) StF: BGBl. I Nr. 102/2002.
- BAFU (2015): Bundesamt für Umwelt BAFU. <http://www.bafu.admin.ch/abfall/02202/12415/14721/index.html?lang=de>, Zugriff am 10.12.2015
- BAWP (2011): Bundesabfallwirtschaftsplan, 2011. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VI/3. Wien.
- BAWP (2014): Bundesabfallwirtschaftsplan, Statusbericht 2014. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VI/3. Wien.
- Bergs, C. (2014): Novelle der Klärschlammverordnung vor dem Hintergrund des Koalitionsvertrages. Klärschlammverordnung und Phosphorrückgewinnung. Luxemburg, 12. Juni 2014.
- Britton, A.T. (2009): P-Recovery in North America – Ostara's PEARL Process. BALTI C21 – Phosphorus Recycling and Good Agricultural Management Practice, 28–30 September 2009, Berlin.
- BMU (2007): Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit NORM-Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchenüblicher Rückstände. (Teil 3b). BMU – 2007–695. B

- Cordell, D., Drangert, J.O., White, S. (2009): The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change* 19 (2), pp. 292–305.
- DeRuiter, R. (2014): The EcoPhos technology to close the P cycle and safeguard the world's food chain. Presentation. Workshop Abwasser – Phosphor – Dünger, 28–29 January 2014. Bundesanstalt für Materialforschung, Berlin.
- Dittrich, B., Klose, R. (2008): Bestimmung und Bewertung von Schwermetallen in Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen und Kultursubstraten. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Heft 3/2008.
- DüngemittelVO AUT (2004): Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, mit der Bestimmungen zur Durchführung des Düngemittelgesetzes 1994 erlassen werden (Düngemittelverordnung 2004) StF: BGBl. II Nr. 100/2004
- DüngemittelVO GER (2012): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV) Bl. I S. 2482.
- DMG (1994): Bundesgesetz über den Verkehr mit Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelgesetz 1994 – DMG 1994).
- EcoPhos (2015): <http://ecophos.com/#/en/news/>, Zugriff Oktober 2015.
- Ehbrecht, A., Schöner, S., Fuderer, T., Schuhmann, R. (2011): P-Recovery from sewage by seeded crystallisation in a pilot plant in batch mode technology. *Water Sci. Technol.* 63 (2), 339–344.
- EK (2013): Europäische Kommission. Consultative Communication on the Sustainable Use of Phosphorus.

- EK (2014): Europäische Kommission. Communication on the review of the list of critical raw materials for the EU and the implementation of the Raw Materials Initiative.
- EK (2015): Europäische Kommission. Public Consultation on the Circular Economy from DG Growth (Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs) http://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/planned_ia/docs/2015_env_065_env+_032_circular_economy_en.pdf.
- EG (2009): Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte.
- Egle, L., Rechberger, H., Zessner, M. (2014a): Phosphorbilanz Österreich. Grundlage für ein nachhaltiges Phosphormanagement – gegenwärtige Situation und zukünftige Entwicklung. Ausgliederter Bericht. Im Auftrag des Bundesministeriums für Forst- und Landwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft. 288 S.
- Egle, L., Rechberger, H., Zessner, M. (2014b): Phosphorrecycling aus dem Abwasser. Bericht. Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft. Technische Universität Wien. Im Auftrag des Bundesministeriums für Forst- und Landwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft.
- Egle, L., Rechberger, H., Zessner, M. (2014c): Vergleich von Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 66. Pp. 30–39. DOI 10.1007/s00506-013-0127-x.

- Egle, L., Zessner, M., Rechberger, H. (2015): Konzept- und Machbarkeitsstudie zur Rückgewinnung von Phosphor aus den Klärschlamm- aschen Wiens. Studie im Auftrag des Magistrat Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien (MA48).
- Elsner, H. (2008): Stand der Phosphat-Reserven weltweit. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. Braunschweiger Nährstofftage 2008.
- Embert (2014): Neues EU-Düngemittelrecht: EU-Düngemittelverordnung - welche Neuerungen sind zu erwarten? VQSD Verband zur Qualitätssicherung von Düngung und Substraten e. V. Jahrestagung 2014.
- EmRegV-OW (2009): Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über ein elektronisches Register zur Erfassung aller wesentlichen Belastungen von Oberflächenwasserkörpern durch Emissionen von Stoffen aus Punktquellen (EmRegV-OW). BGBl. II Nr. 29/2009.
- Ewert, W. (2009): Verfahren zur Optimierung der anaeroben Schlammbehandlung bei Anwendung der biologischen Phosphatelimination. 6. Klärschlammtag in Fulda. 12-14 Mai 2009. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- Garcia, R.A., Rosentrater, K.A. (2008): Concentration of key elements in North America meat & bone meal. Biomass and Bioenergy 32, 887-891.
- Giesen, A. (2002): The Crystalactor - Abwasserbehandlung mittels Kristallisation ohne Abfälle. DHV Water BV. Netherlands.
- Greenpeace (2013): Living with Danger. An investigation of phosphogypsum pollution in the Phosphate Fertilizer Industry, Sichuan Province.
- Grüner, G., Mallon, J., Schaaf, M., Reinmüller, F. (Phosphorrecycling mit dem Mephrec-Verfahren - Stand der Entwicklung) in Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 12. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015, S. 491-504.
- Grüner Bericht (2015): Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft, Bundesministerium für Forst- und Landwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft. <http://www.gruenerbericht.at>
- Heinzmann, B., Lengemann, A. (2011): Stand des Phosphorrückgewinnung in Berlin - von wissenschaftlichen Untersuchungen zur großtechnischen Anwendung" (Phosphorus Recovery in Berlin - From Scientific Investigations to Large Scale Application). Proceedings of the International Symposium Re-Water Braunschweig, Wiederverwertung Energie Wasser und Nährstoffe, 21-22 November 2011.
- IFDC (2011): International Fertiliser Development Center. <http://www.ifdc.org/Home>
- Krüger, O., Adam, C. (2014): Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungssaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotenziale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik. TEXTE 49/2014 Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 37 11 33 321 UBA-FB 001951, Berlin
- Kratz, S., Knappe, F., Rogasik, J., Schnug, E. (2008): Uranium balances in agroecosystems. In: de Kok, L. J. and Schnug, E. (eds.) (2008) Loads and fate of fertilizer-derived uranium. Backhuys Publishers, Leiden. pp. 179-190.
- Kratz, S., Schick, J., Schnug, E. (2016): Trace elements in rock phosphates and P containing mineral and organo-mineral fertilizers sold in Germany. Science of the Total Environment 542. Pp. 1013-1019.
- Lebek, M., Lohmar, S. (2013): Nährstoffrückgewinnung in der Lebensmittelverarbeitung - Das REPHOS® Verfahren. Phosphorrückgewinnung - Aktueller Stand von Technologien-Einsatzmöglichkeiten und Kosten? Vortrag im Rahmen der gemeinsamen Informationsveranstaltung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Umweltbundesamtes. 9.10.13, Bonn.
- Lefferts, M. (2012): Referenzanlagen zur Phosphorrückgewinnung SNB Moerdijk - Niederlande. ÖWAV-Klärschlammseminar 2012. 22./23. November 2012, Wels.
- Mauschitz, G. (2013): Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie - Berichtsjahr 2012. Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften. Technische Universität Wien. 2013.
- Meister, W., Nedyalkov, K., Seebacher, R., Mann, M. (2014): Gemeindefinanzbericht 2014. Rechnungsjahr 2013. Kommunalkredit Austria/Strategie und Recht. Türkenstraße 9, 1092 Wien.
- Mélé, C., Paillard, H., Deleris, S., Bardoux, J. (2014): Nouveau procédé de recyclage du Phosphore issu des effluents concentrés. Veolia Eau. Séminaire Phosph'Or, Rennes, 23rd January 2014.
- Montag, D. (2008): Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung - Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen. Dissertation. Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- Montag, D., Everding, W., Malms, S., Pinnekamp, J., Reinhardt, J., Fehrenbach, H., Arnold, U., Trimborn, M., Goldbach, H., Klett, W., Lammers, T. (2014): Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz. Forschungskennzahl 3713 26 301UBA-FB-002120 Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, 52056 Aachen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Morf, L. (Phosphorrecycling im Kanton Zürich Strategie und Verfahrenswahl. Rückgewinnung und Verwertung von Phosphor aus Klärschlamm: Revision der TVA und neue Verfahren, VSA/SVUT-Fachtagung, Tecorbe.ch, 23. Oktober 2015, Yverdon-les-Bains
- Nawamura, Y., Kumashiro, K., Ishiwatari, H. (2001): A pilot plant study on using seawater as a magnesium source for struvite precipitation. In: Proceedings cd, 2nd International Conference on Recovery of Phosphates from Sewage and Animal Wastes, Holland, CEEP.
- NuReSys (2015): Nutrient recycling systems. Recycling nature's essentials, <http://nuresys.be.apache22.hostbasket.com/>.
- ÖWAV (2014): Positionspapier des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV): Klärschlamm als Ressource. September 2014.
- Pinnekamp, J., Wiebke, E. (2011): „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“ BMBF/BMU Förderinitiative. Schlusspräsentation. 14.09.2011. Umweltforum Auferstehungskirche Berlin. In: GEWÄSSERSCHUTZ-WASSER-ABWASSER 228. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen
- Pinnekamp, J., Malms, S., Montag, D., Schmelz, K.-G., van der Meer, M., Lehmann, F., Blöthe, U., Eitner, R., Klett, W., Schwetzel, W. (2014): „ZWIPHOS - Entwicklung eines Zwischenlagerungskonzepts für Klärschlammmonoverbrennungssaschen für Deutschland mit dem Ziel einer späteren Phosphorrückgewinnung“. Abschlussbericht zum BMBF-Projekt, FKZ 033R101/8/
- Pfundtner, E. (2015): Persönliche Mitteilung am 2. 12. 2015. Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit. Abteilung für Bodengesundheit und Pflanzenernährung.
- Rex, M., Drissen, P., Bartsch, S., Breuer, J., Pischke, J. (Aufschluss von Phosphor aus Klärschlamm - und Tiermehlaschen in flüssiger Konverterschlacke. Workshop Abwasser - Phosphor - Dünger 29.1.14. Berlin.
- Scheidig, K., Mallon, J., Schaaf, M., Riedl, R. (2013): P-Recycling-Dünger aus der Schmelzvergasung von Klärschlamm und Klärschlamm-asche. KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall 10. pp. 845-850.
- Schipper, W.J., Klapwijk, A., Potjer, B., Rulkens, W.H., Temmink, B.G., Kiestra, F.D.G., Lijmbach, A.C.M. (2001): Phosphate recycling in the phosphorus industry. Environ. Technol. 22 (11), 1337.
- Scholz, C. (2014) Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Abteilung VI/3. Abfallwirtschaftsplan, Abfallbehandlung und Altlastensanierung. Persönliche Information am 27.5.14.
- SNB (2015): Slibverwerking Noord-Brabant. <http://www.snb.nl/overeenkomst-snb-met-belgische-ecophos/>
- Statistik Austria (2015): Bevölkerungsstand und Bevölkerungsveränderung. Demographisches Jahrbuch. www.statistik-austria.at
- Steppich, D. (2015): The thermo-reductive RecoPhos Process - From Sewage Sludge Ashes to elementary Phosphorus for industrial Applications RecoPhos - Demonstration Event Leoben, February 24th 2015.
- Tayibi, H., Choura, M., López, F.A., Alguacil, F.J., López-Delgado, A. (2009): Environmental impact and management of phosphogypsum. Journal of Environmental Management. Journal of Environmental Management 90 (8), pp. 2377-2386.
- Thornton, C. (2015): European Sustainable Phosphorus Platform persönliche Mitteilung 9.9.15.
- Ten Wolde, K., Langeveld, K. (2013): Nutzung von Recyclingphosphaten als Rohstoff zur Düngemittelproduktion: Rahmenbedingungen und Möglichkeiten. 4. Internationales Symposium. Re-Water Braunschweig. 6-7. November Braunschweig.
- Ueno, Y., Fujii, M. (2003): 3 years operating experience selling recovered struvite from full-scale plant. Environ. Technol. 22 (11), 1373-1381.
- UMTEC (2009): Abfall als Ressource. Deponierelevante Eigenschaften von Klärschlamm-asche. Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik.
- USGS (2010): U.S. Geological Survey, Mineral commodity summaries 2010. U.S. Geological Survey, 193p.
- USGS (2012): U.S. Geological Survey, Mineral commodity summaries 2012. U.S. Geological Survey, 198p.
- Weidelehner, A. (2010): Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP). Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 202, Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft E.V. Stuttgart.
- Zoboli, O., Laner, D., Zessner, M. and Rechberger, H. (2015): Added Values of Time Series in Material Flow Analysis. The Austrian Phosphorus Budget from 1990 to 2011. Journal of Industrial Ecology. In press
- Weltbank (2015): GEM Commodities. Resources. <http://data.worldbank.org/data-catalog/commodity-price-data>